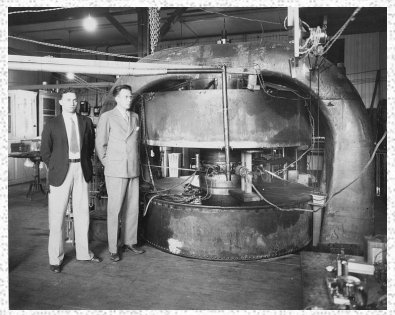
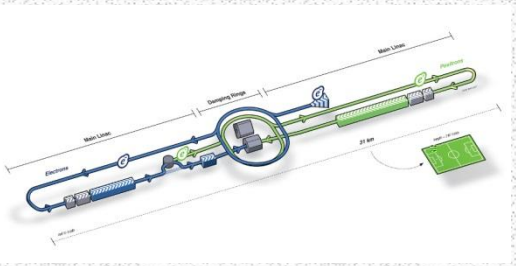
ПРИСКОРЮВАЧІ ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТИНОК

Лекція №1

ВСТУП



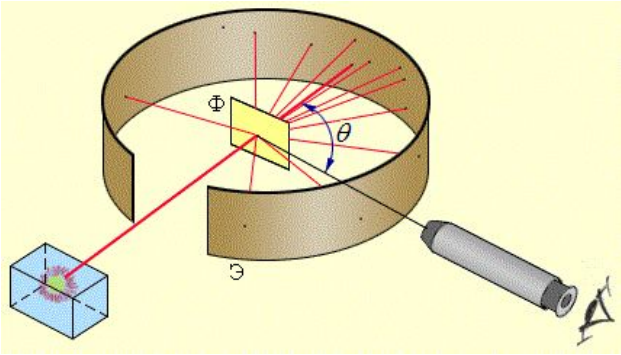


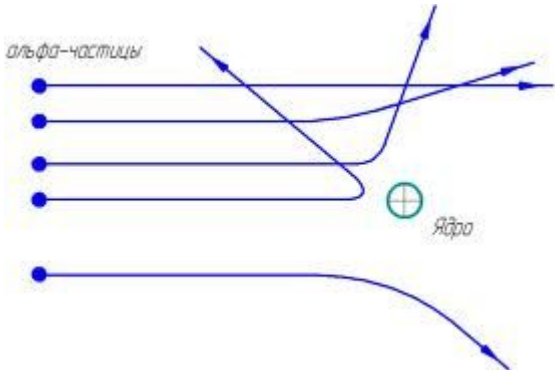
Задачі:

1. ***Фундаментальні дослідження*** – вивчення структури ядра та механізмів ядерних реакцій

2. ***Прикладні використання*** (медицина, промислові використання та інше) – як важливе доповнення до першої задачі

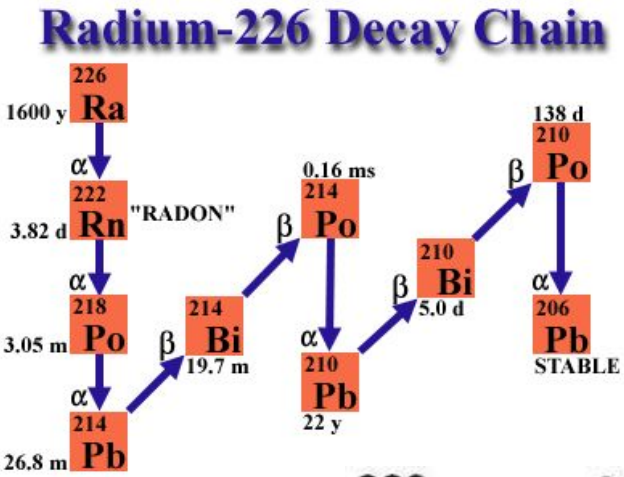
Обмеження природних джерел частинок для бомбардування ядер

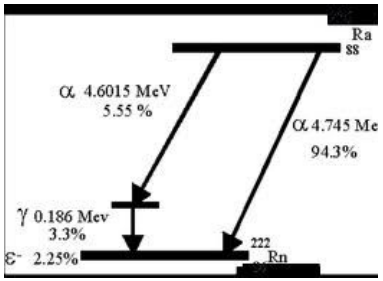




Ернест Резерфорд (1871-1937)

- Ернест Резерфорд британський фізик, лауреат Нобелівської премії з хімії (1908).
- Резерфорд відомий перед усім експериментами з розсіювання альфа-частинок (Резерфордівське розсіювання), завдяки якому він встановив структуру атома, як системи, що складається із малого за розмірами позитивно зарядженого ядра й електронів.





$$^{226}_{88}Ra \Rightarrow ^{222}_{86}Rn + \alpha$$

Thorium 232		Thorium	$_{90}Th^{232}$	1.41x10 y	3.95 (24%) 4.01 (76%)
↓					
Radium 228		Mesothorium I	$_{88}Ra^{228}$ ($MsTh_1$)	6.7 y	none
↓					
Actinium 228		Mesothorium II	$_{89}Ac^{228}$ ($MsTh_2$)	6.13 h	none
↓					
Thorium 228		Radiothorium	$_{90}Th^{228}$ (RdTh)	1.910 y	5.34 (28%) 5.43 (71%)
↓					
Radium 224		Thorium X	$_{88}Ra^{224}$ (ThX)	3.64 d	5.45 (6%) 5.68 (94%)
↓					
Radon 220		Thoron (Em)	$_{86}Rn^{220}$ (Tn)	55 sec	6.29 (100%)
↓					
Polonium 216		Thorium A	$_{84}Po^{216}$ (ThA)	0.15 sec	6.78 (100%)
↓					
Lead 212		Thorium B	$_{82}Pb^{212}$ (ThB)	10.64 h	none
↓					
Bismuth 212		Thorium C	$_{83}Bi^{212}$ (ThC)	60.6 min	6.05 (25%) 6.09 (10%)
↓					
Polonium 212	64%	Thorium C^{I}	$_{84}Po^{212}$ (ThC^{1})	304 nano sec.	8.78 (100%)
Thallium 208	36%	Thorium C^{II}	$_{81}Tl^{208}$ (ThC^{11})	3.10 min	none
↓					
Lead 208		Thorium D	$_{82}Pb^{208}$ (ThD)	Stable	none

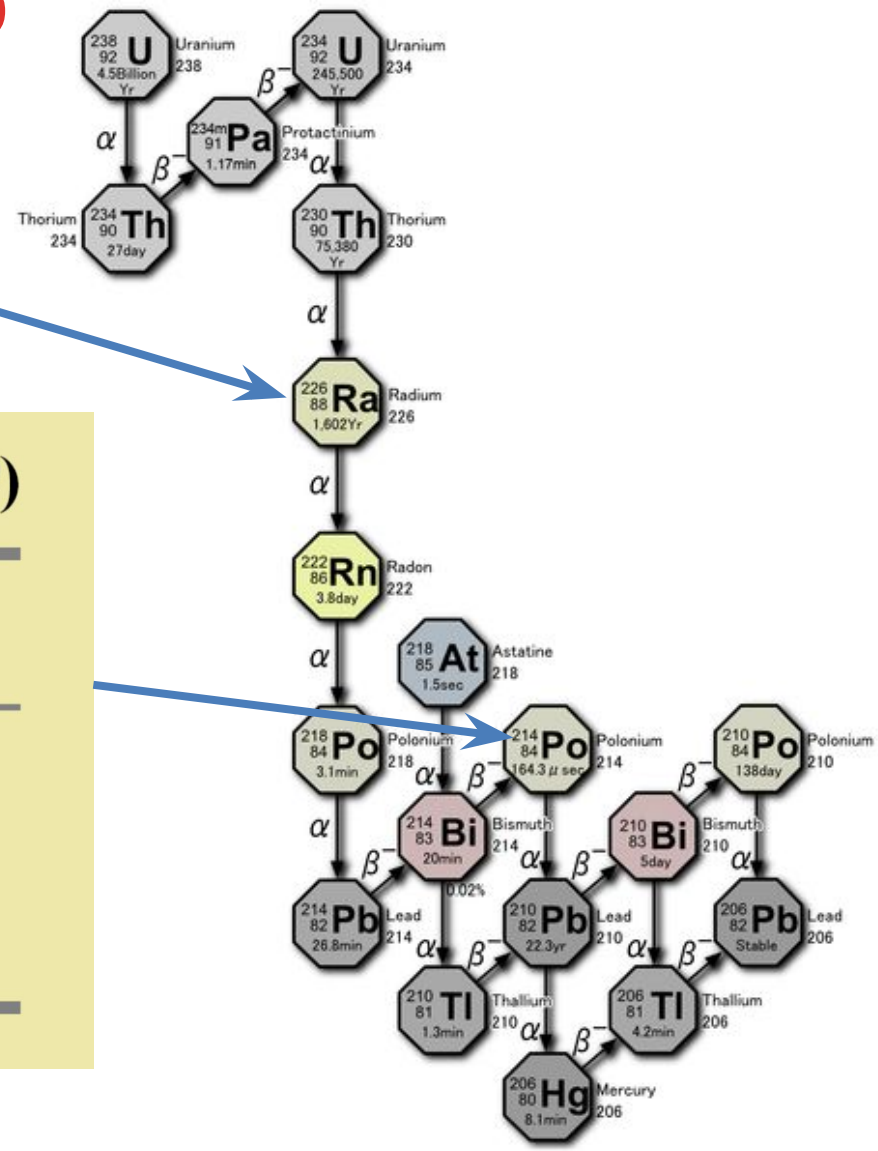
Обмеження природних джерел частинок для бомбардування ядер

^{226}Ra

^{214}Po

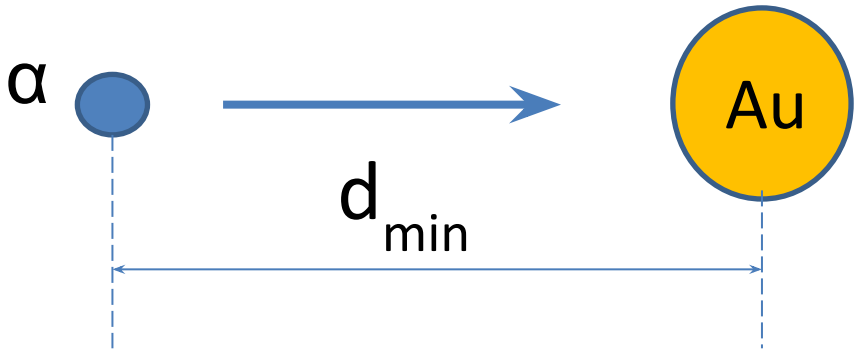
Alphas from ^{214}Po (164.3 us *20*)

Eα (keV)	Iα (%)
6609.9 *10*	6.0E-5 *20*
6902.1 *2*	0.0104 *6*
7686.82 *7*	99.9895 *6*



Для вивчення ядра енергій частинок від природних радіоактивних джерел явно недостатньо (інтенсивності космічного випромінювання дуже низькі і не контрольовані)

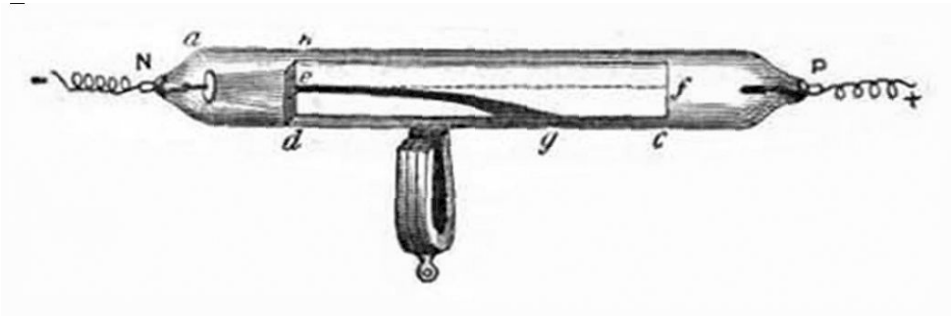
^{226}**Ra** 7.7 МеВ → $d_{min} \approx 30$ фм



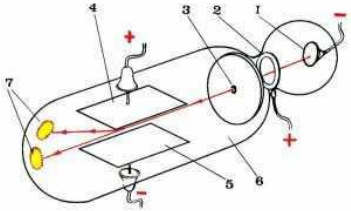
Історичні попередники (прискорення електронів)

В 1853 році французький науковець А. Массон спробував пропускати електричні розряди (іскри) через скляну трубку, з якої відкачено повітря

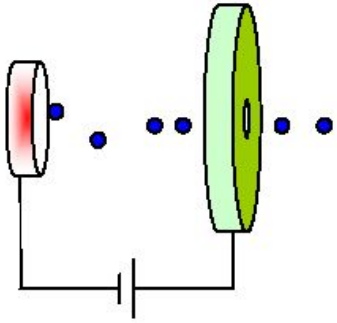
В 1870 році відкриття катодних променів англійським вченим Вільямом Круксом (William Crookes) – круксові трубки

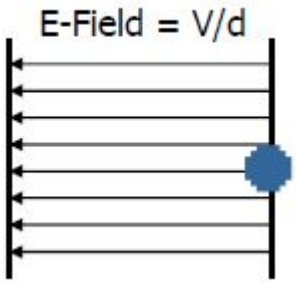


В 1896-1897 роки - англійський фізик Дж. Дж. Томсон – схожа трубка, довів, що катодні промені – електрони, визначив для нього відношення його заряду до маси



Прості формули в основі





$$eV = E_{kin} = (\gamma - 1)mc^2$$

$$F = eE = e\frac{V}{d}$$

$$Fd = E_{kin} = eV$$

$$\upsilon = \sqrt{1 - \left(\frac{mc^2}{eV + mc^2}\right)} \cdot c \quad < c$$

Energie [eV]	Energie [Joule]	Velocity Electron [511keV/c^2]	Velocity Proton [938 MeV/c^2]
1 eV	1.6×10^{-19} J	593 km/s 0.002 c	14 km/s 0.00005 c
1 keV	1.6×10^{-16} J	18730 km/s 0.062 c	438 km/s 0.0015 c
1 MeV	1.6×10^{-13} J	282128 km/s 0.94 c	13832 km/s 0.046 c
1 GeV	1.6×10^{-10} J	299792 km/s 0.9999998 c	262338 km/s 0.88 c
1 TeV	1.6×10^{-7} J	299792 km/s 0.9999999999998 c	299792 km/s 0.9999996 c
7 TeV	1.1×10^{-8} J	299792 km/s 0.999999999999997 c	299792 km/s 0.999999991 c

Basic Formalism

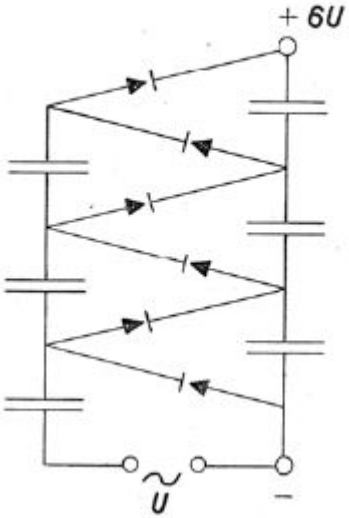
Energy

$$E = E_0 + E_{kin}$$

- Rest Energy: $E_0 = m_0 c^2$
- Relativistic Parameter: $\gamma = E / E_0$
- Velocity: $v = \beta c$
- Relativistic Mass: $m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}} = \gamma m_0$
- Energy in eV: $1eV = 0.16 \cdot 10^{-18} J$

(Electron rest mass $9.1*10^{-31}$kg gives a rest energy of 511 keV)

Каскадний прискорювач генератор Кокрофта –Уолта (Cockroft-Walton)



Greinacher cascade

Каскадний перемножувач напруги

1932

Каскадний прискорювач генератор Кокрофта –Уолта (Cockroft-Walton)

Sir John Douglas Cockcroft
* 27 May 1897, Todmorden ,UK
† 18 September 1967, Cambridge, UK

Ernest Thomas Sinton Walton
* 6 October1903, Dungarvan, Ireland
† 25 June 1995, Belfast, Ireland

700 (800) кВ

Протони з енергією 400 кВ

$^{7}Li + p \longrightarrow {}^{4}He + {}^{4}He$

$^{7}Li + p \longrightarrow {}^{7}Be + n$

УФТІ, 10 жовтня 1932, ЕСГ, К.Синельников, А. Лейпунський, А.Вальтер, А. Латишев

Nobel Price 1951
"for their pioneer work on the transmutation of atomic nuclei by artificially accelerated atomic particles"

Трансмутація атомних ядер з використанням прискорених атомних частинок

Каскадний прискорювач генератор Кокрофта –Уолта (Cockroft-Walton)

Acceleration with an electrostatic field

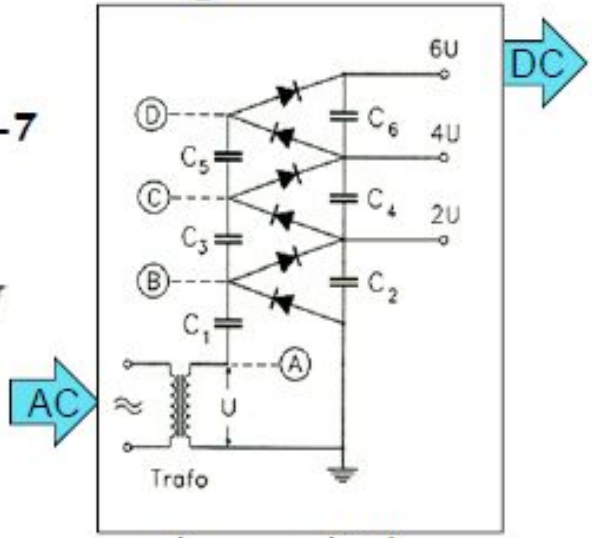
Cockcroft-Walton generator

(1932)

400 keV p → Lithium-7

↓

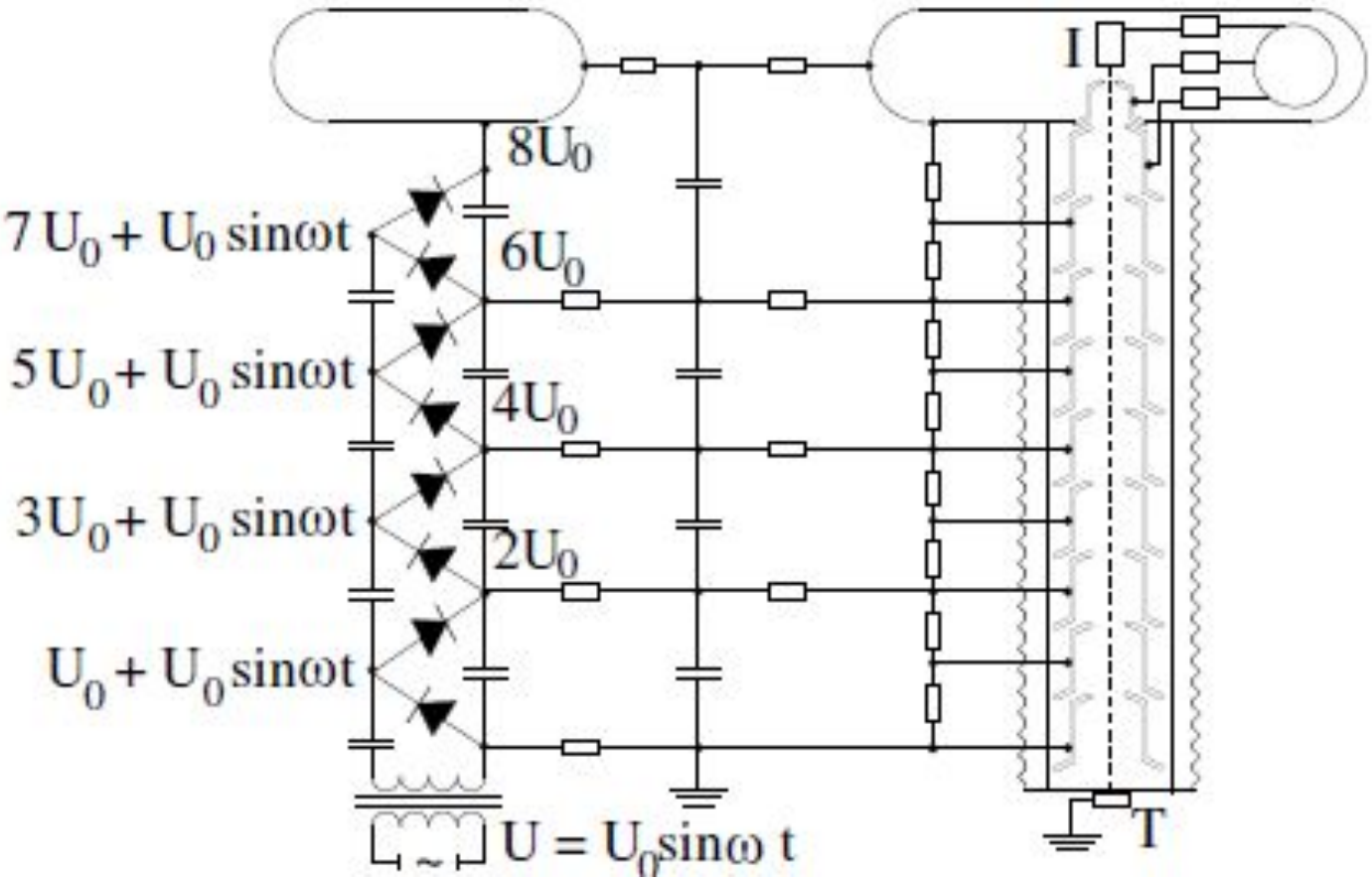
$^{4}He + {}^{4}He + 17{,}35\ MeV$



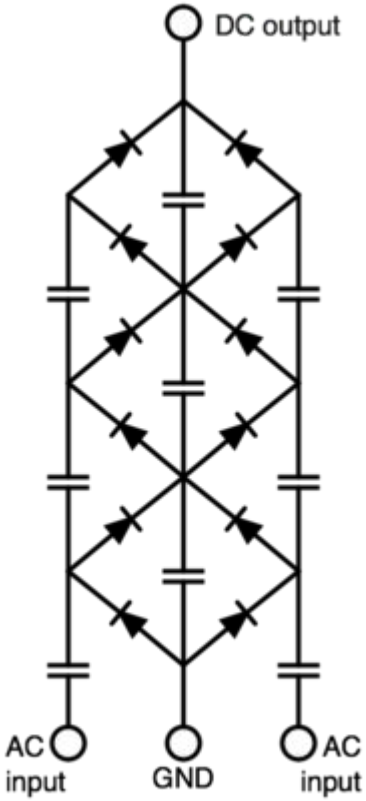
voltage multiplier

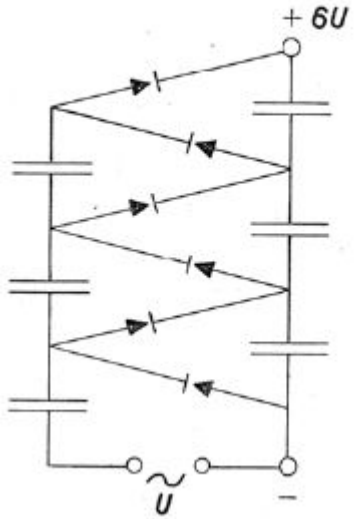
maximum voltage < 1 MV

Каскадний прискорювач генератор Кокрофта –Уолта (Cockroft-Walton)



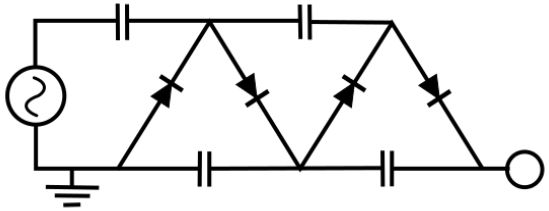
Каскадний перемножувач – схема Грейнахера (Грайнахер-Greinacher)





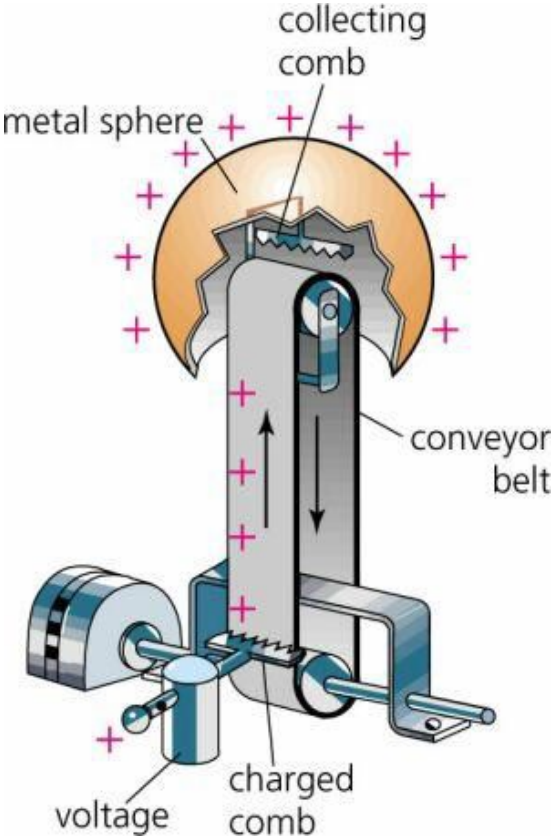
Greinacher cascade

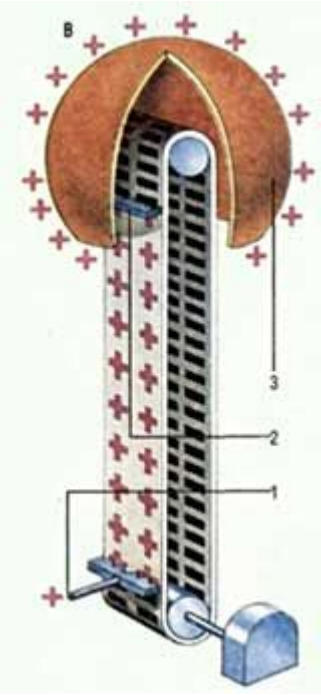
Каскадний перемножувач напруги



Електростатичний генератор (ЕСГ) (Високовольтний генератор Ван-де-Граафа)

High voltage generation: Van de Graaff Generator





Електростатичний генератор (ЕСГ) - Високовольтний генератор Ван-де-Граафа

High voltage generation: Van de Graaff Generator

Robert Jemison Van de Graaff
20 December 1901
16 January 1967

associate professor, Massachusetts Institute of Technology (MIT)

Перші генератори

1929 рік - 80 кВ (з допомогою Nicholas Burke, Princeton University)

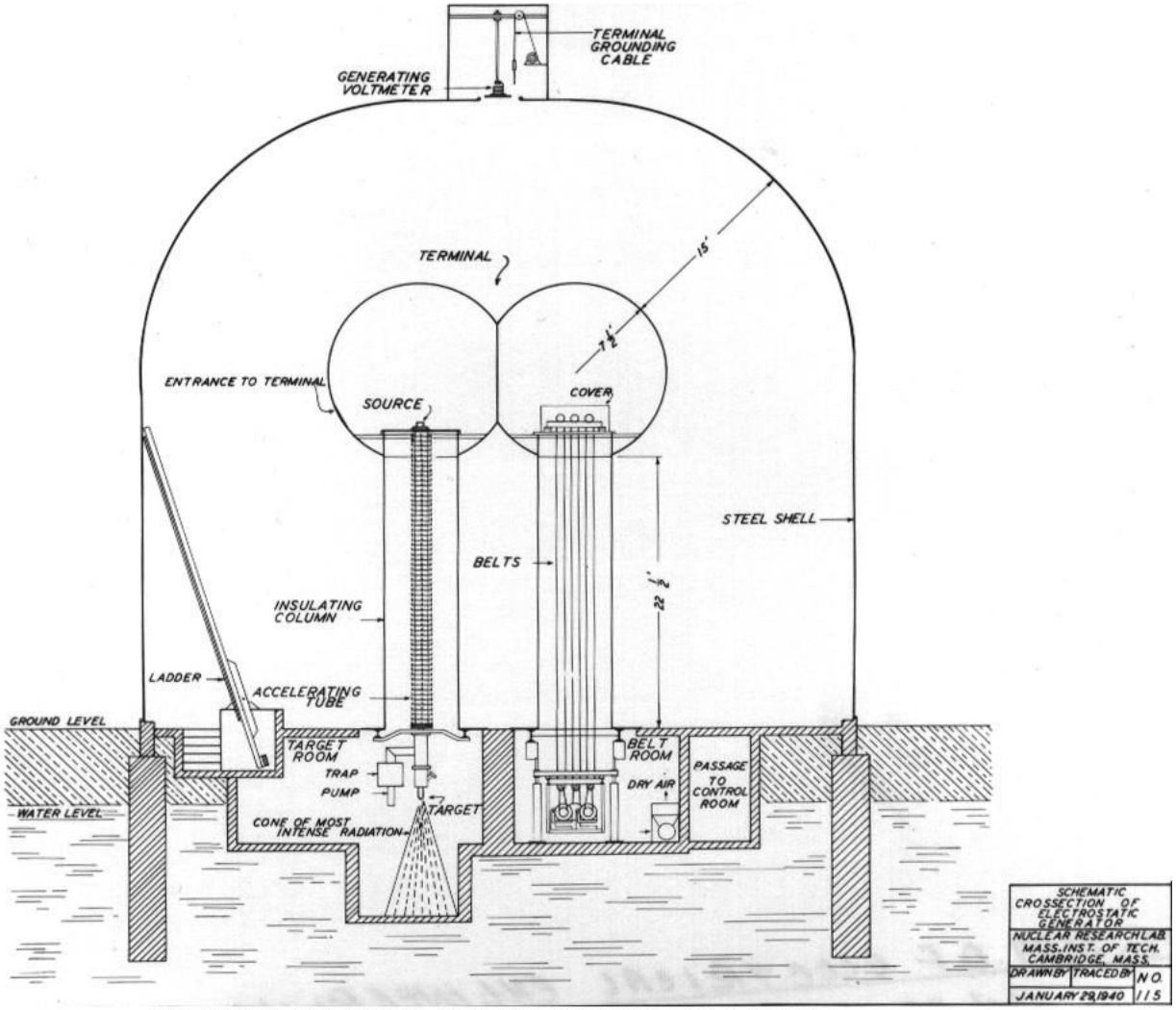
1932 рік - 1 МВ

1933 рік - 7 МВ

УФТІ, 10 жовтня 1932, ЕСГ, К.Синельников, А. Лейпунський, А.Вальтер, А. Латишев

$^{7}Li + p \rightarrow {}^{4}He + {}^{4}He$

Електростатичний генератор (ЕСГ) - Високовольтний генератор Ван-де-Граафа



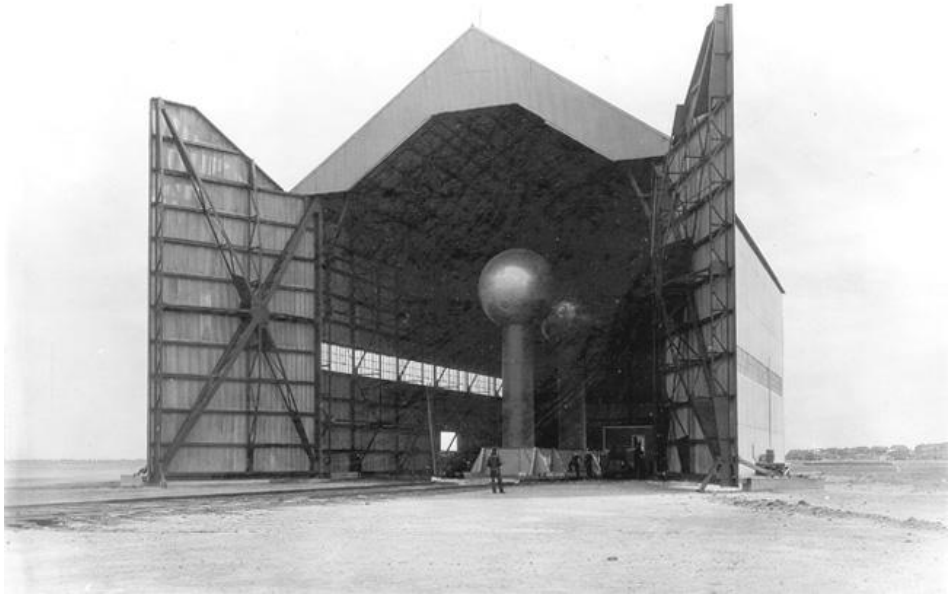
CUTAWAY DIAGRAM OF THE GENERATOR AT MIT
SHOWING X-RAY PRODUCTION DOWN LEFT COLUMN

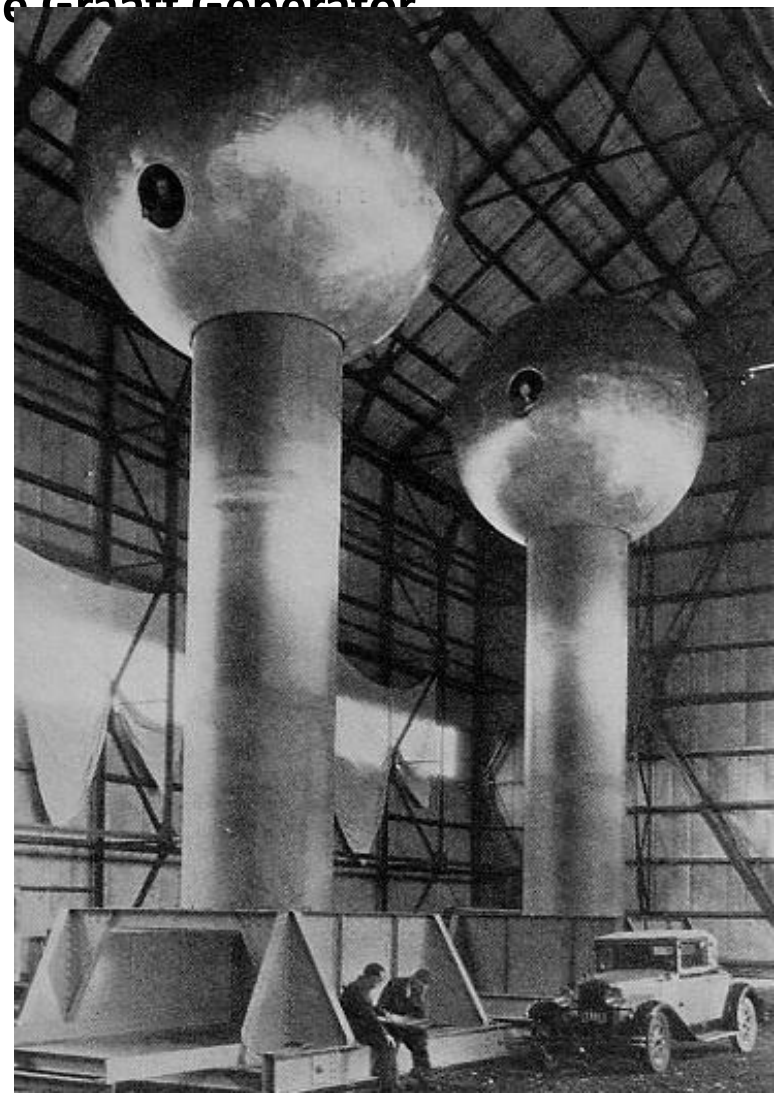
©MIT Museum
All rights reserved

Електростатичний генератор (ЕСГ) - Високовольтний генератор Ван-де-Граафа

High voltage generation: Van de Graaff Generator

Ван-де-Грааф прискорювач МІТ.
Почали будувати до другої світової війни – запустили на повну енергію 10 МеВ вже після війни.
Сфери в діаметрі 15 футів, обладнання в сферах на висоті 43



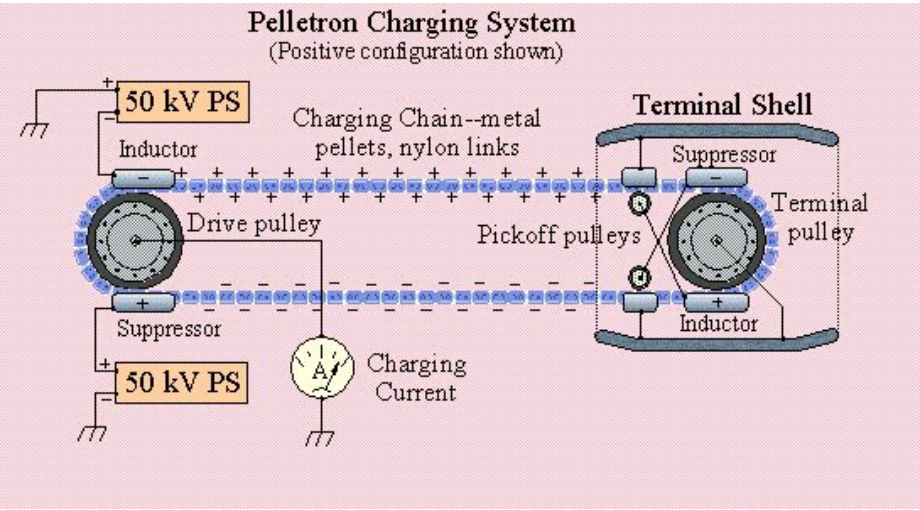


Електростатичний генератор (ЕСГ) - Високовольтний генератор Ван-де-Граафа

High voltage generation: Van de Graaff Generator

Koffler accelerator at the
Weizmann Institute of Science, Rehovot
Israel

14 MV Pelletron
Accelerator Mass Spectrometry (AMS) with
14C, 7Be, 10Be, 26Al, 36Cl, 41Ca,
44Ti, 59Ni, 90Sr, 129I, 236U, 239Pu,
240Pu, 242Pu, 244Pu



Електростатичний генератор (ЕСГ) - Високовольтний генератор Ван-де-Граафа

High voltage generation: Van de Graaff Generator

Відео 1

Відео 2

Відео 3

Відео 4

Відео 5

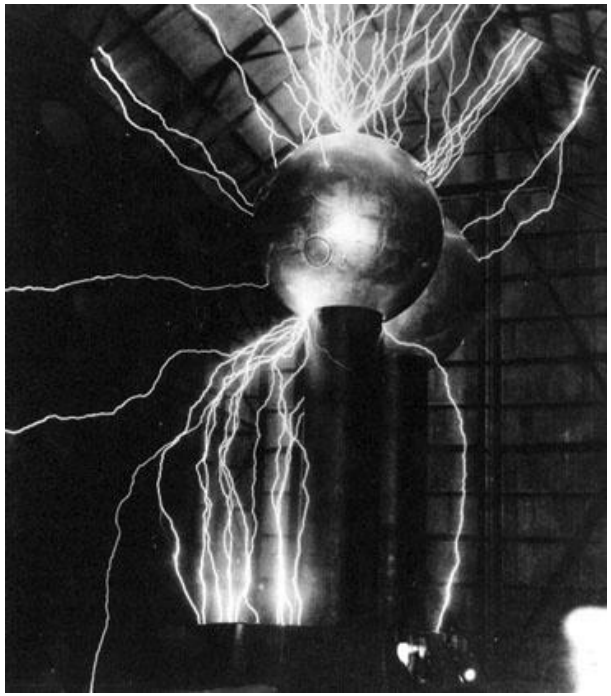
Відео 6

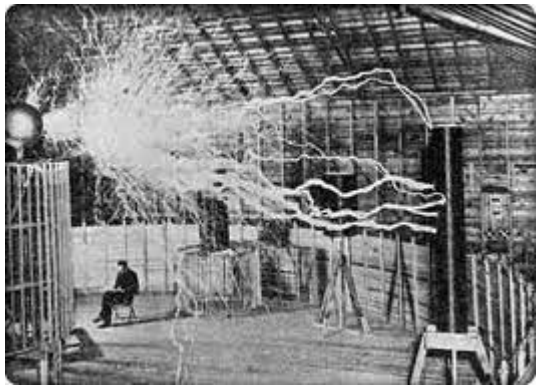
Відео 7

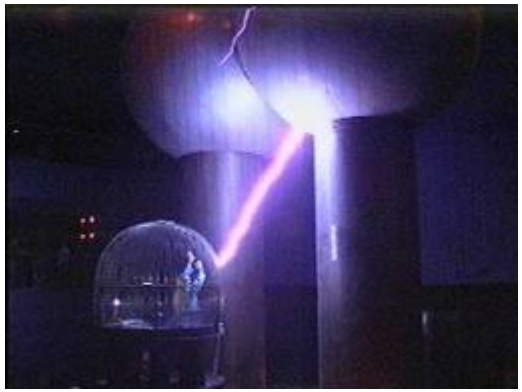
Високовольтні пробої в повітрі – Швидкий кінець епохи прискорювачів прямої дії - каскадних та електростатичних (Ван-де-Граафа) – і розквіт любителів блискавок

http://tesladownunder.com/

Високовольтні пробої в повітрі – Швидкий кінець епохи прискорювачів прямої дії - каскадних та електростатичних (Ван-де-Граафа)







Сухий азот Еле-газ

ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ ИОНЫ

- Одним из самых перспективных изолирующих материалов в электроэнергетике является высокопрочный газ – ***элегаз***.
- ***Элегаз*** – шестифтористая сера – газ с ярко выраженными электроотрицательными свойствами.

MyShared

ЕЛЕГАЗ

Гексафторид сірки (елегаз або шестифториста сірка, SF_6)

неорганічна речовина, при нормальних умовах важкий газ, в 5 разів важчий за повітря.

Практично безбарвний газ,

має високу пробивну напругу (89 кВ/см). Електрична міцність елегазу залежить від тиску, вона в 2-4 рази вище, ніж у повітря.

Назва «елегаз» шестифториста сірка отримала від скорочення «електричний газ»

Електрична міцність при атмосферному тиску і зазорі 1 см становить E = 89 кВ/см

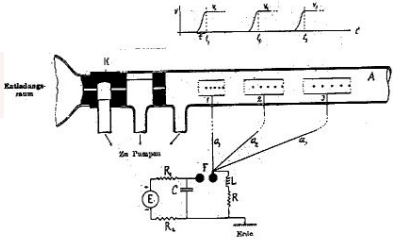
У центрі молекули елегазу розташований атом сірки, а на рівній відстані від нього в вершинах правильного октаедра розташовуються шість атомів фтору. Це визначає високу ефективність захоплення електронів молекулами, їх відносно велику довжину вільного пробігу і слабку реакційну здатність. Тому елегаз має високу електричну міцність.

Елегаз нешкідливий у суміші з повітрям. Однак внаслідок порушення технології виробництва елегазу або його розкладання в апараті під дією електричних розрядів (дугового, коронного, часткових), в елегазі можуть виникати **надзвичайно активні в хімічному відношенні і шкідливі для людини домішки**, а також різні тверді з'єднання, що осідають на стінах конструкції. Інтенсивність утворення таких домішок залежить від наявності в елегазі домішок кисню і особливо пари води.

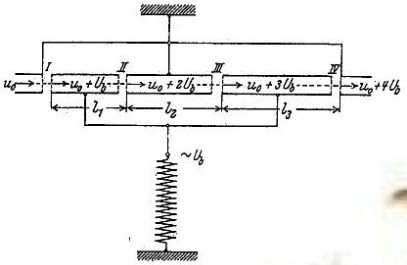
Альтернатива прямому прискоренню з використанням високої напруги – багатократне прискорення відносно низькою напругою – лінійні та циклічні прискорювачі

Лінійні прискорювач

Швед Густав Адольф Ізінг (Gustaf Adolf Ising) - 1924 - запропонував принцип лінійного резонансного прискорювача



Норвезький фізик Рольф Відерое (*Rolf Wideröe*) – 1928 – перший демонстраційний резонансний лінійни

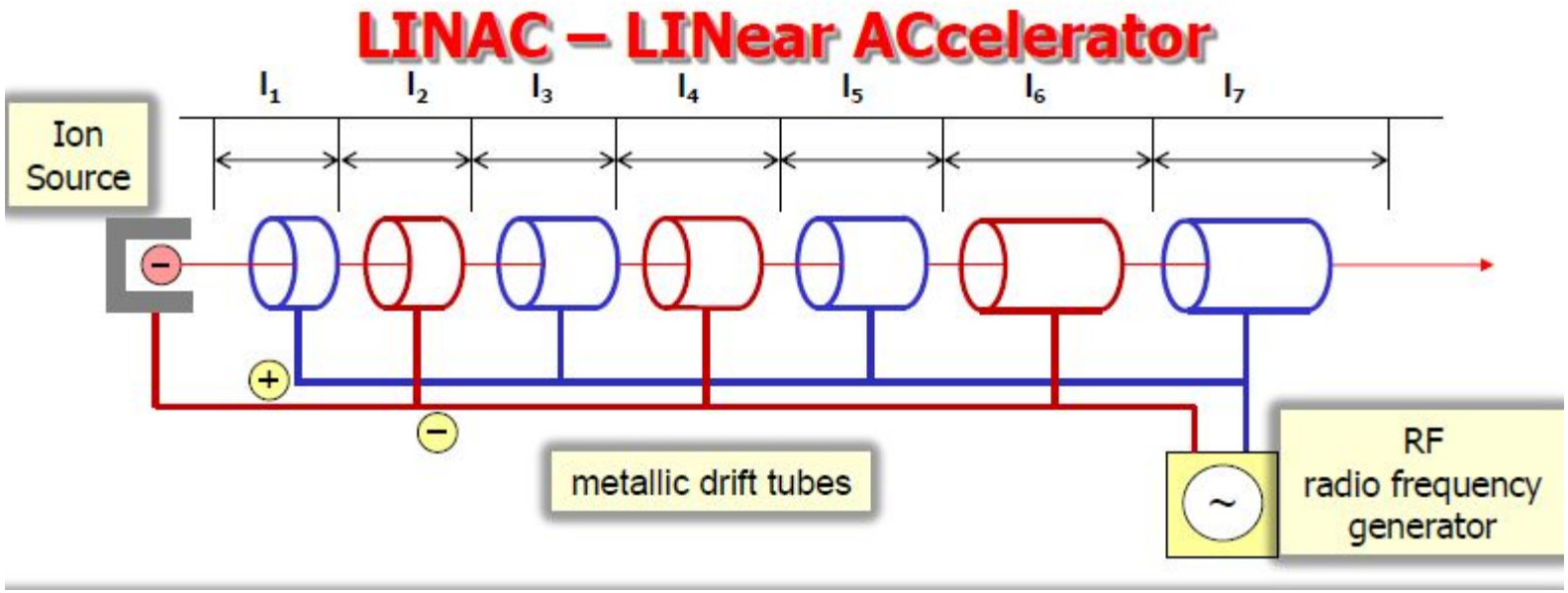


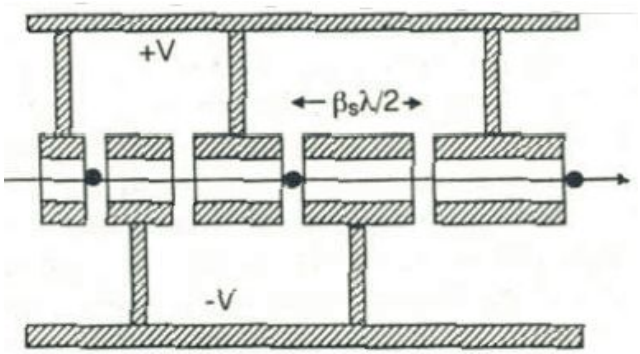
50 кеВ, іони натрія, напругою 25 кВ

Рольф Відерое біля одної з моделей лінійного резонансного прискорювача в музеї Röntgen-Museum in Remscheid

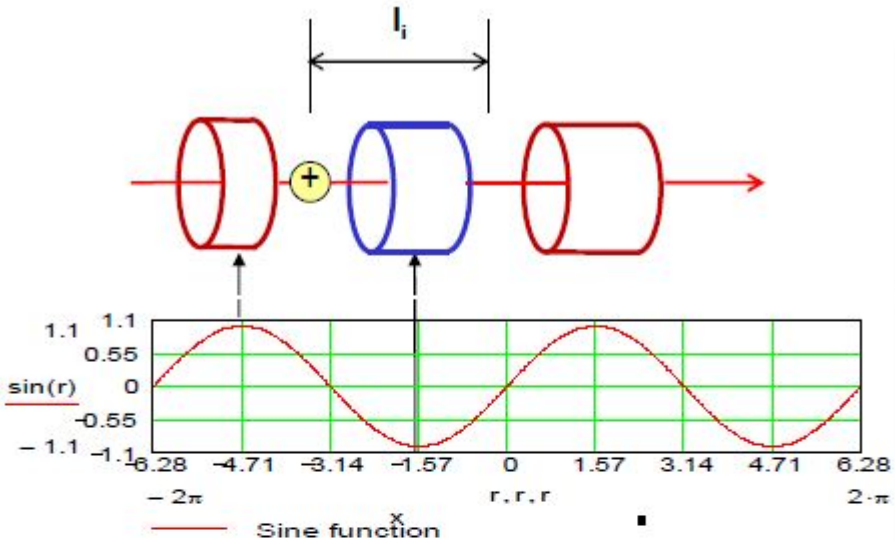
Рольф Відерое (Rolf Wideröe)
11 липня, 1902, Осло, Норвегіяя
11 жовтня, 1996, Nussbaumen, Швейцарія

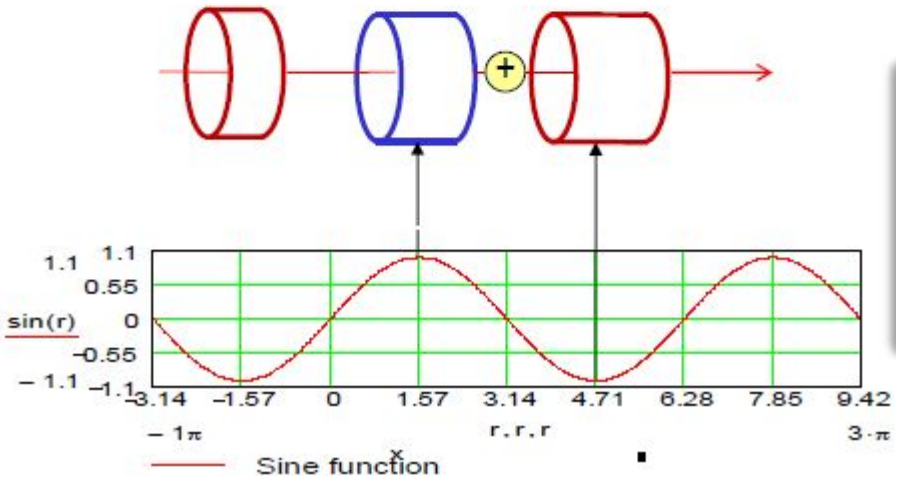
Лінійний резонасний радіочастотний прискорювач (схема Відерое)





Лінійний резонасний радіочастотний прискорювач

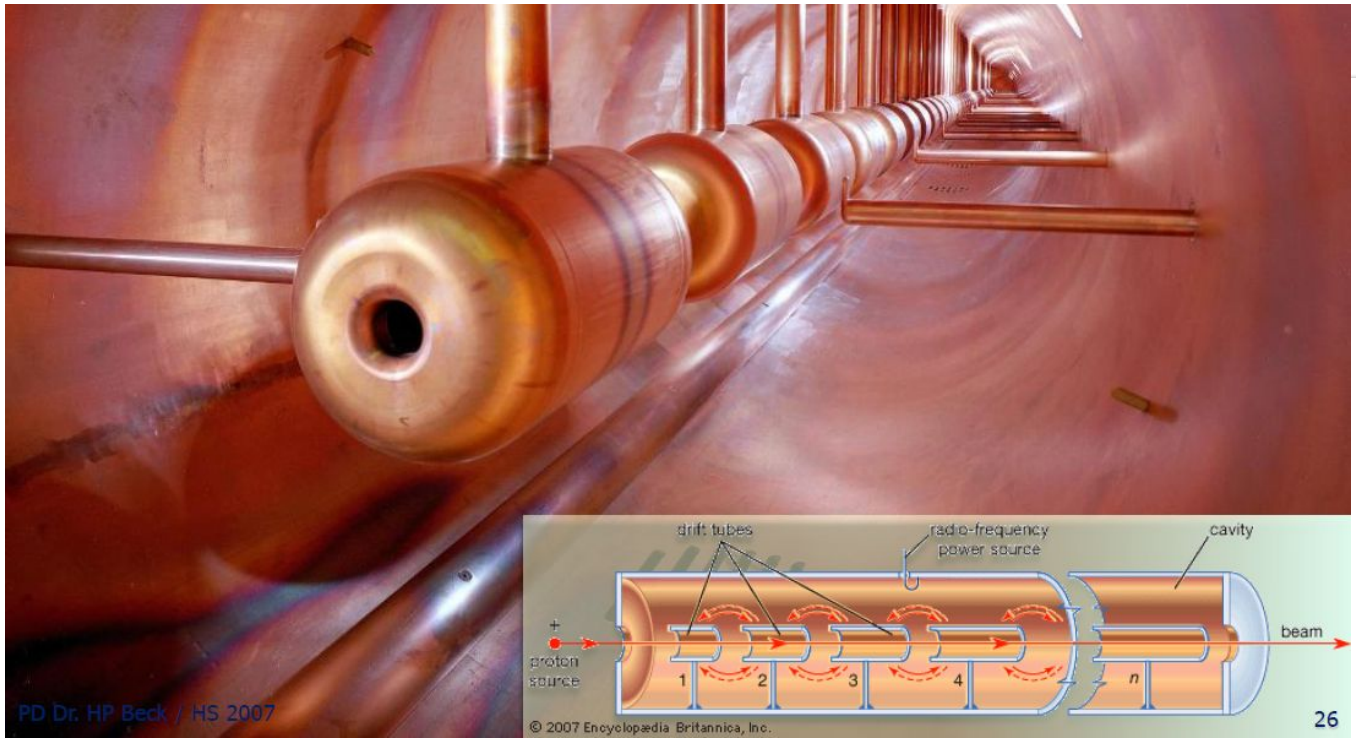


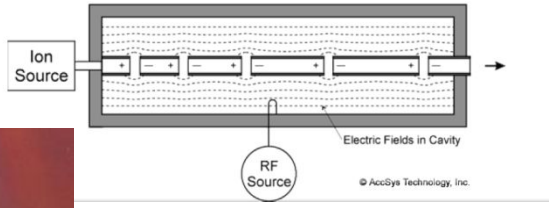


Неможливо прискорювати неперервні пучки, а тільки банчі (bunches)

Лінійний резонасний радіочастотний прискорювач (прискорювач Альвареца)

1947 - Alvarez LINAC

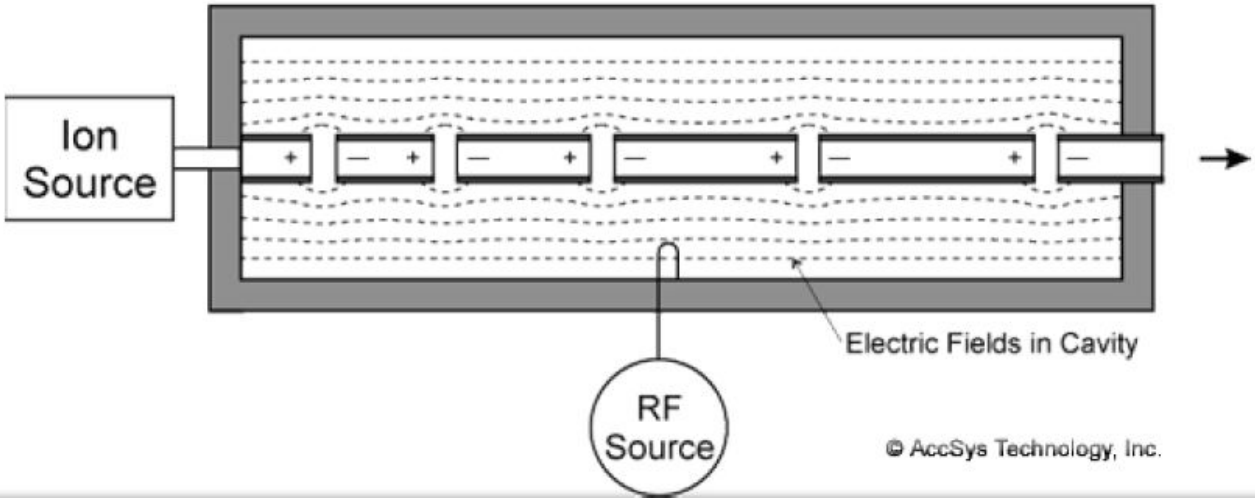




Більшість сучасних протонних лінійних прискорювачів - в основі схема прискорення Альвареца

Лінійний резонасний радіочастотний прискорювач (прискорювач Альвареца)

1947 - Alvarez LINAC

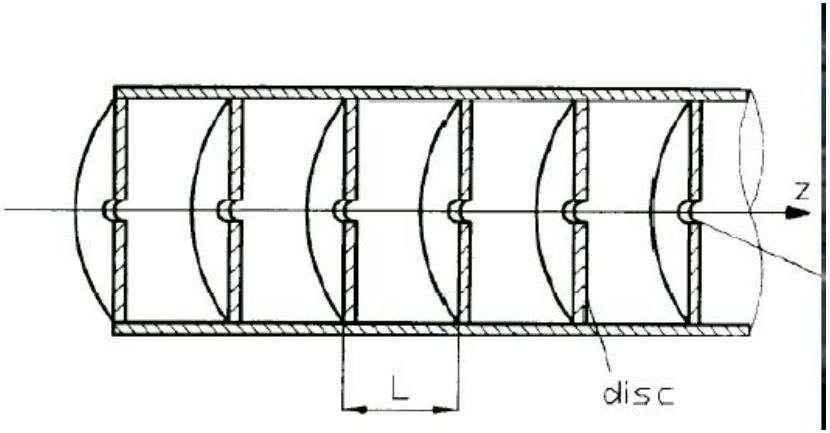


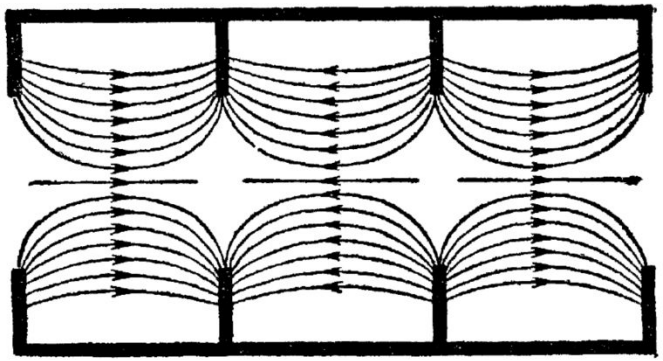
Luis Walter Alvarez
13 June, 1911, San Francisco, US
1 September, 1988, Berkeley, US

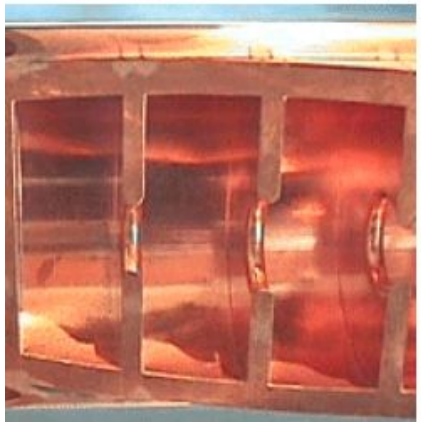
Альварец – Нобелівська премія 1968 року за внесок у фізику елементарних частинок (велика кількість резонансів, воднева бульбашкова камера, обробка даних)

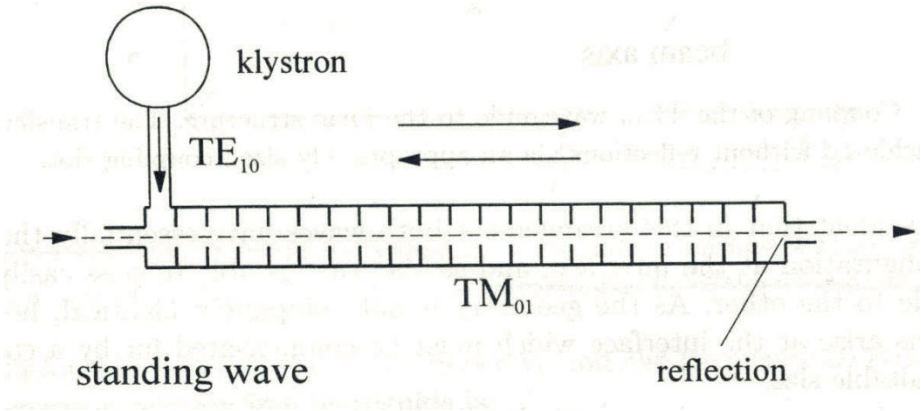
Для схеми Відероу – підводи до трубок дрейфу несуть напругу, для схеми Альвареца – тільки охолодження

Лінійний резонасний радіочастотний прискорювач для електронів (Схема хвильовода з кільцевими діафрагмами – Disk-Loaded Waveguide)

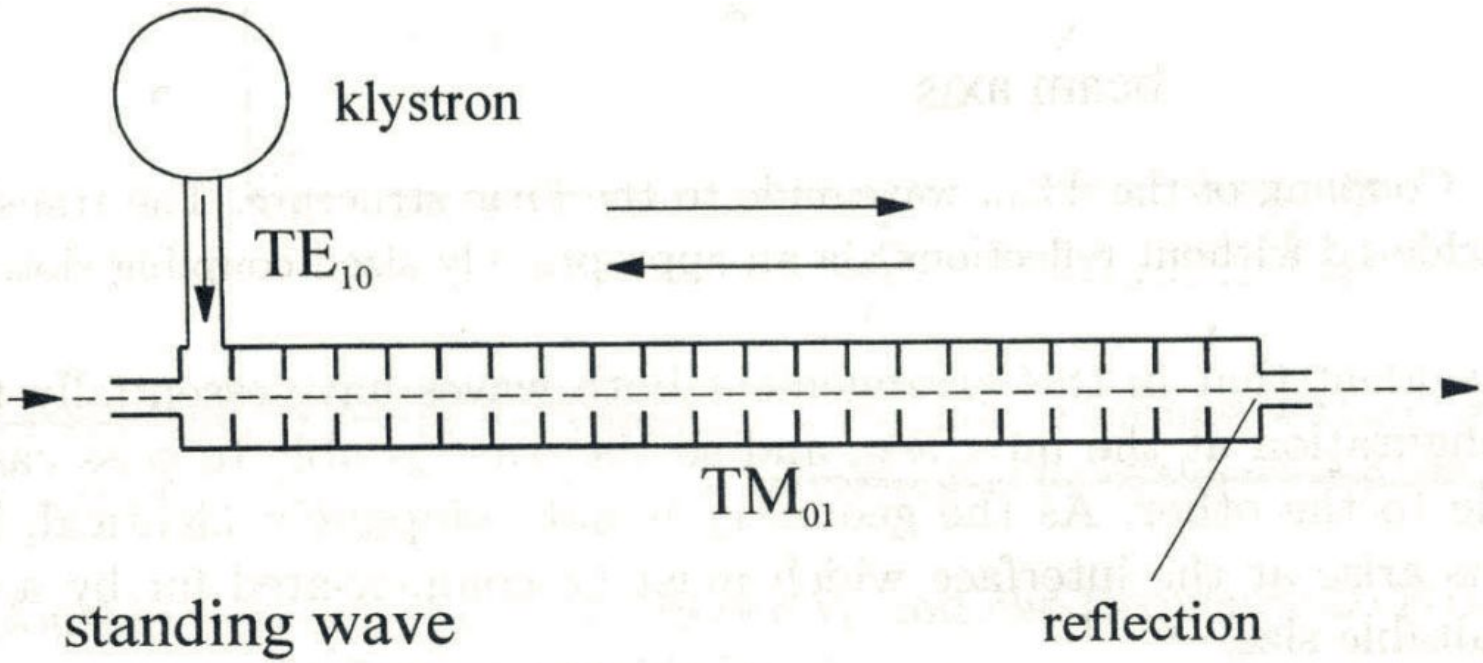






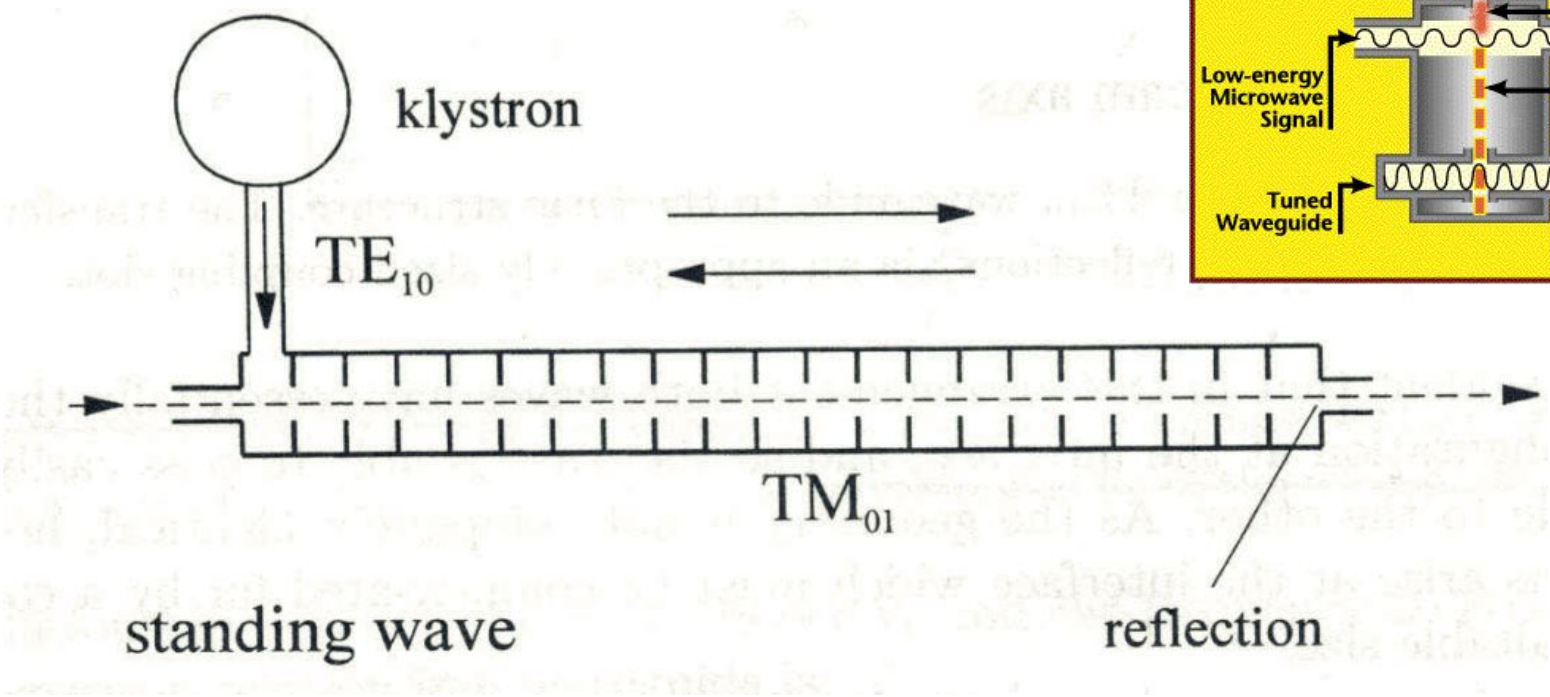


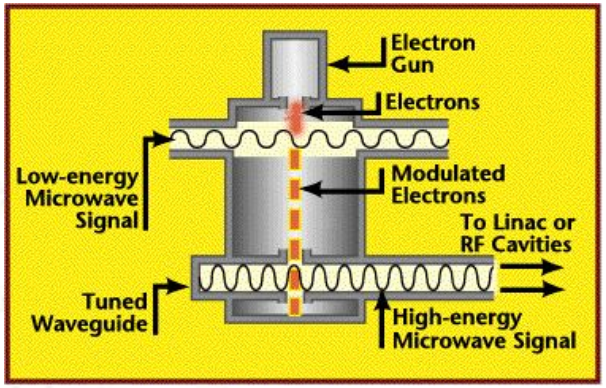
Лінійний резонасний радіочастотний прискорювач для електронів (Магнетрони -> Клістрони)



Лінійний резонасний радіочастотний прискорювач для електронів (Магнетрони -> Клістрони)

1939: Hansen and Varian brothers invent the klystron





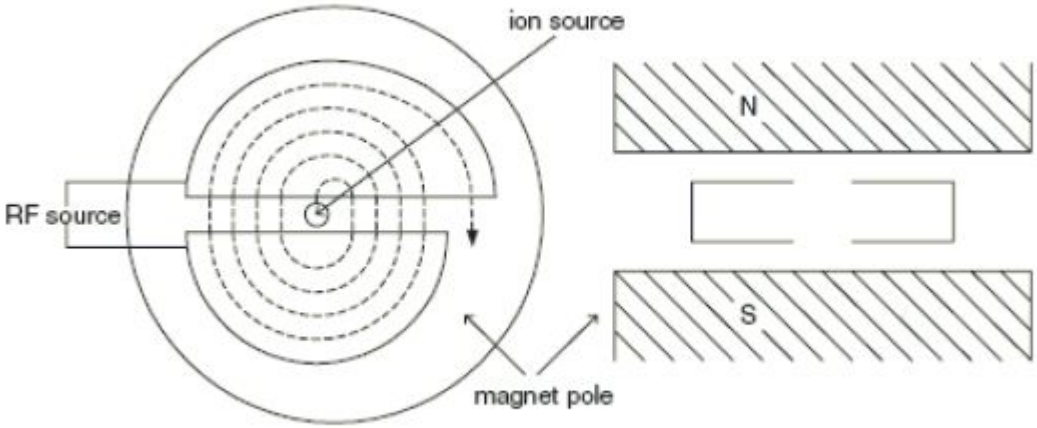
Циклотрон (Лоуренс, 1932)

The first cyclotron
4.5” diameter (1929).

First ring accelerator
1930 Ernest Lawrence
in Berkeley, USA.

E. O. Lawrence: Nobel Prize, 1939

Лоуренса надихнула ідея Відерс



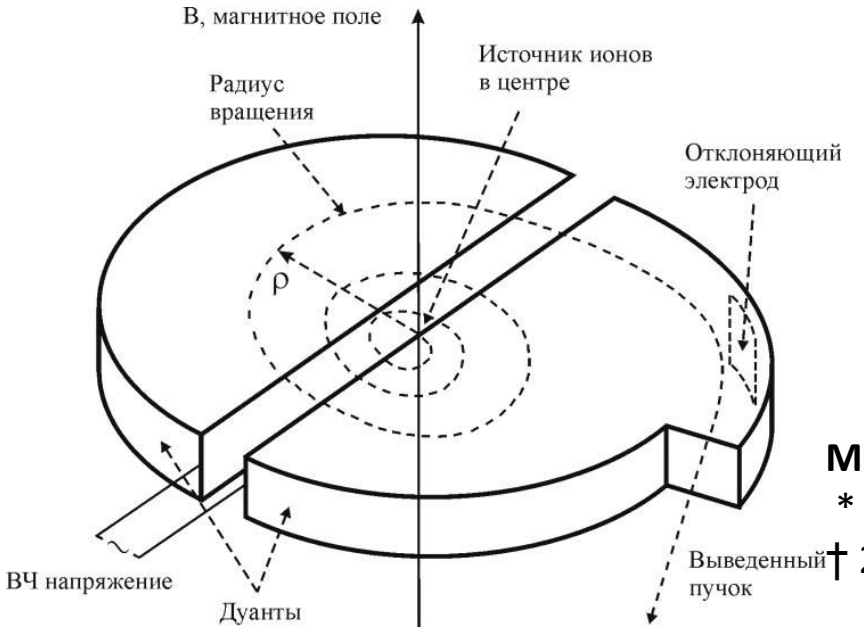
2000 В □ 80 кВ

Для протонів першого циклотрону
2 січня 1930 року - зробив аспірант Лоуренса
Лівінгстон

Lawrence and Livingston construct first cyclotron (1932), accelerating 1.2 MeV protons

Циклотрон

Ernest Lawrence
* 8. August 1901
† 27. August 1958

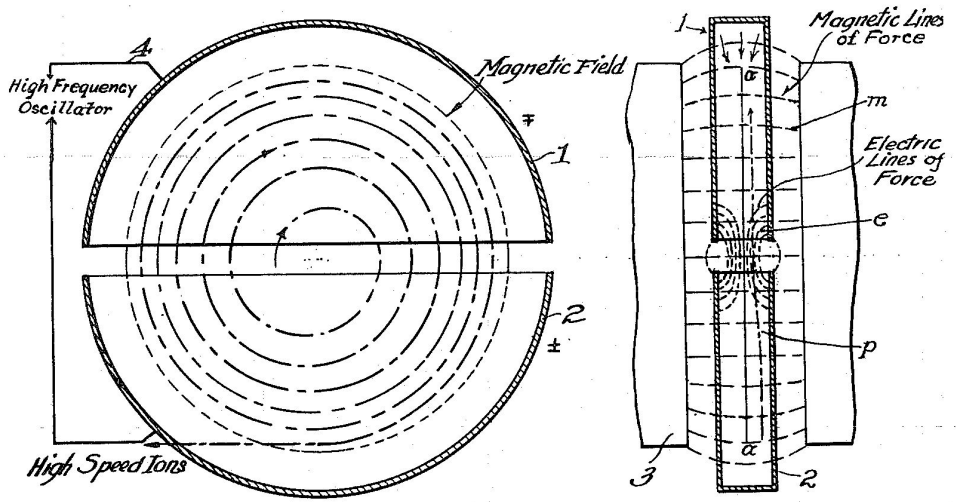


Milton Stanley Livingston
* 25 May 1905
† 25 August 1986

E. O. Lawrence: Nobel Prize, 1939

"for the invention and development of the cyclotron and for results obtained with it, especially with regard to artificial radioactive elements"

Циклотрон



2000 В □ 80 кВ

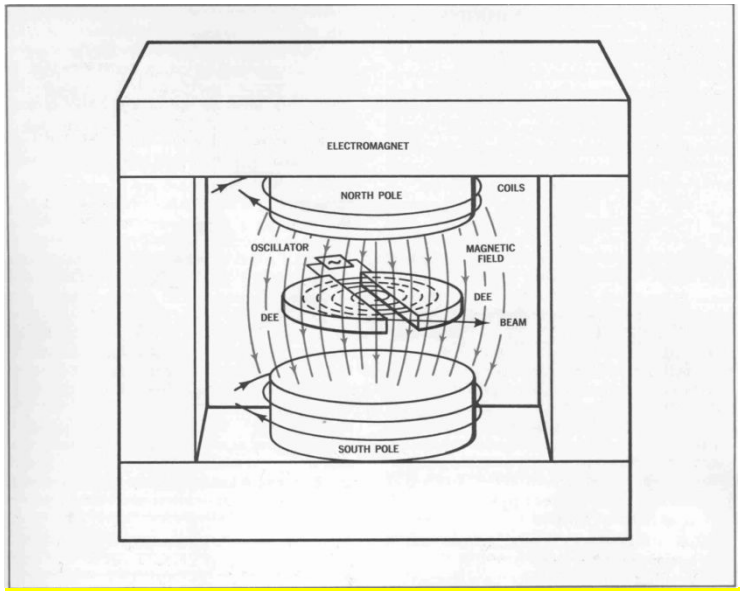
Для протонів першого циклотрону

$$\frac{mv^2}{r} = qvB$$

$$\boxed{r = \frac{mv}{qB}}$$

$$T = \frac{L}{v} = 2\pi r/v$$

$$\boxed{T = \frac{2\pi m}{qB} \qquad \omega = \frac{qB}{m}}$$



Період не залежить від швидкості (енергії) нерелятивістської частинки

Циклотрон

Циклотрон:

- Постійне магнітне поле
- Нерелятивістські частинки

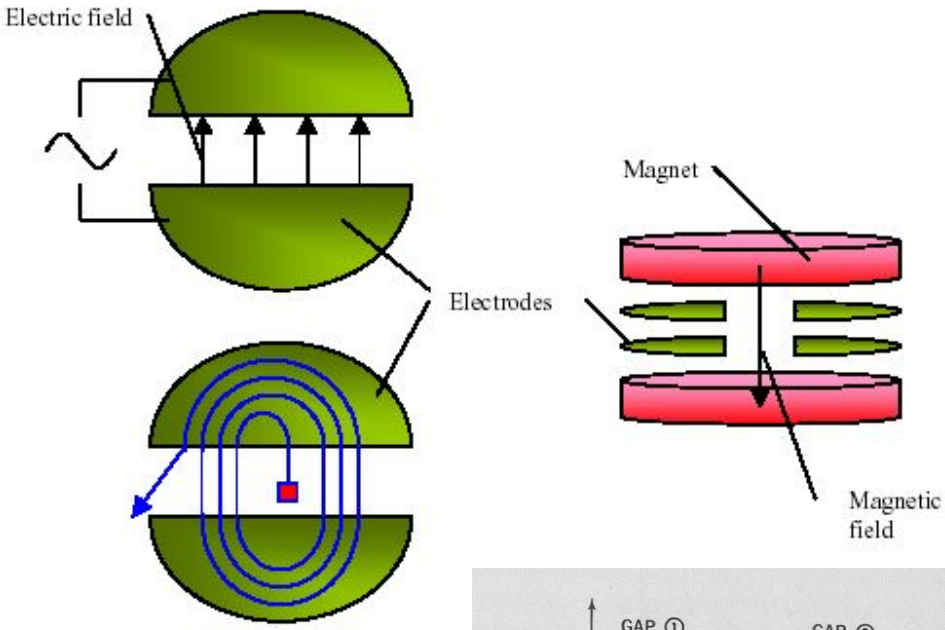
$$F = \frac{mv^2}{r}$$

$$F = qvB$$

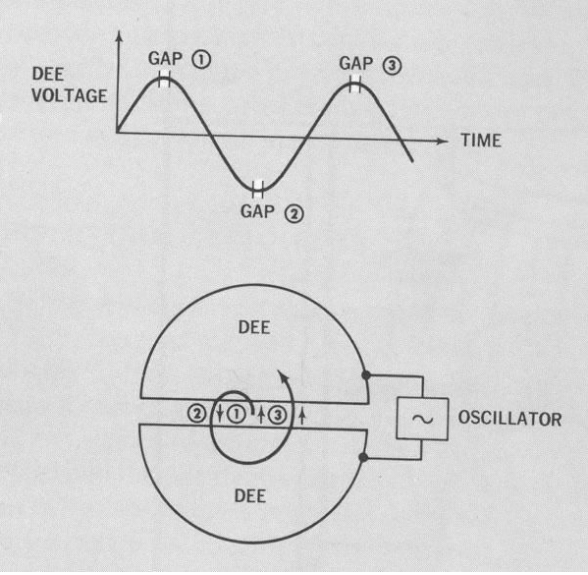
$$r = \frac{mv}{qB}$$

$$v = \frac{rqB}{m}$$

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{qB}$$



$$rB = \frac{mv}{q}$$



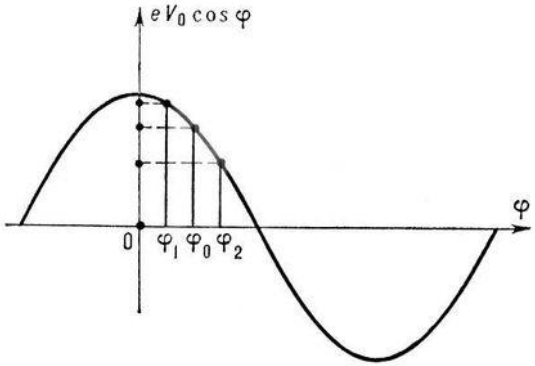
Циклотрон
Автофазування

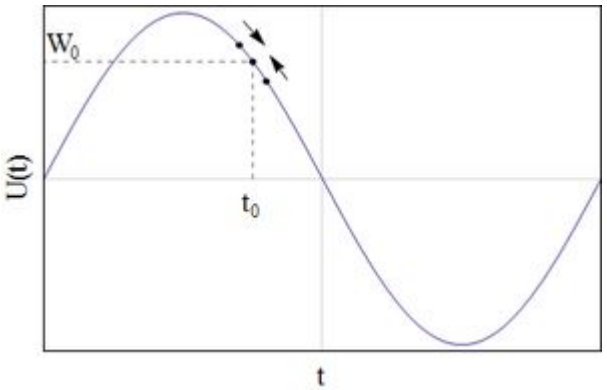
Принцип автофазування відкрили В.І.Векслер (1944 р.) і незалежно Е. Макміллан (1945)

$$T = \frac{2\pi m}{qB}$$

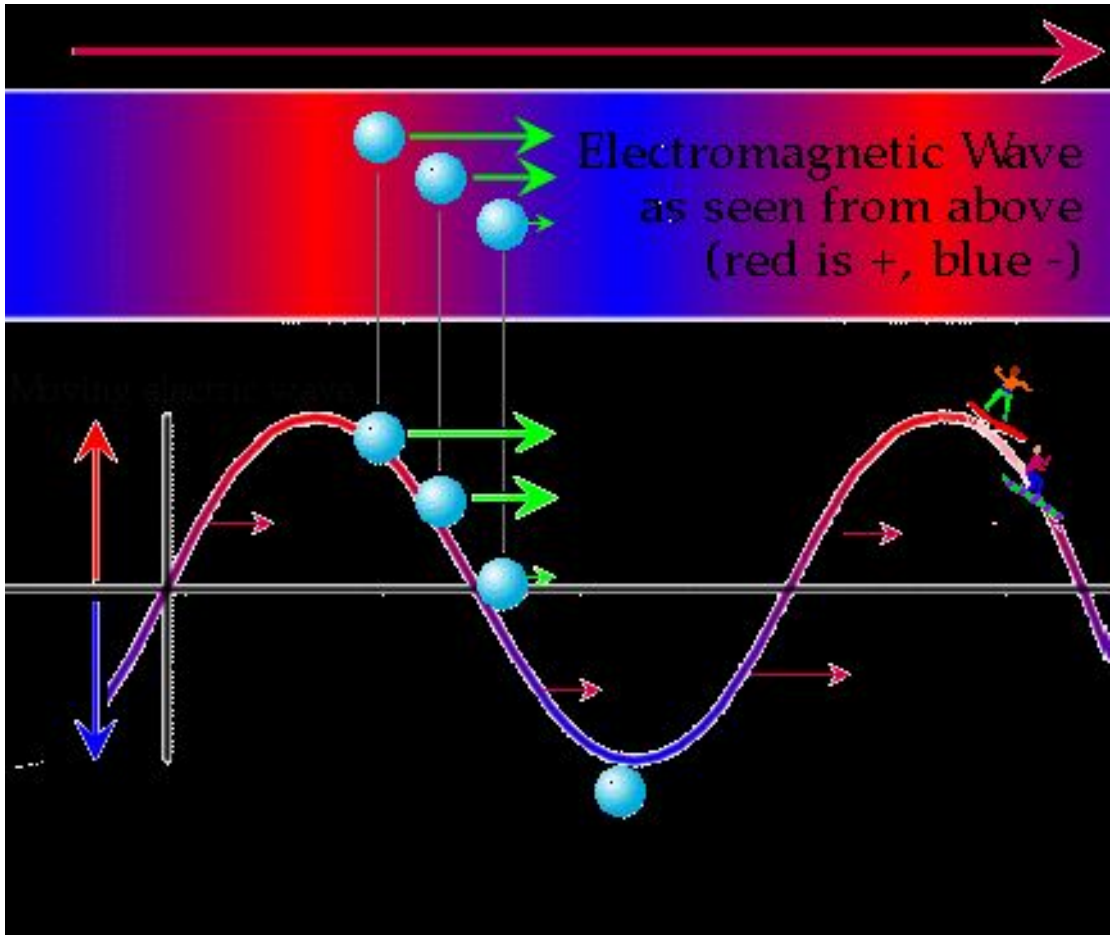
$$T = \frac{2\pi m}{qB} \qquad \omega = \frac{qB}{m}$$

Релятивістські ефекти □ еквівалентне «збільшення» маси □ **T** трохи міняється





Циклотрон
Автофазування



Вертикальне фокусування в циклотроні

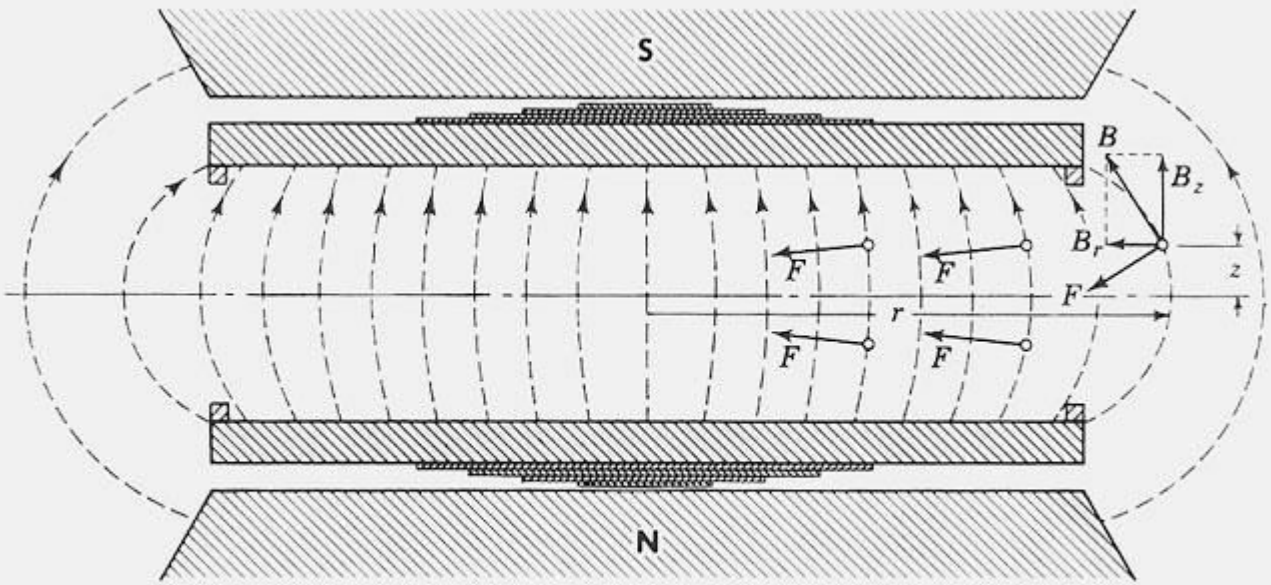


Fig. 6-7. Radially decreasing magnetic field between poles of a cyclotron magnet, showing shims for field correction.

Приклад: характеристики циклотрона для енергії протонів 20 МеВ

$B_{\text{циклотрона}}$=1 Т

$$f_{\text{циклотрона}} = \frac{eB}{2\pi m} = 15.244\ \text{МГц}$$

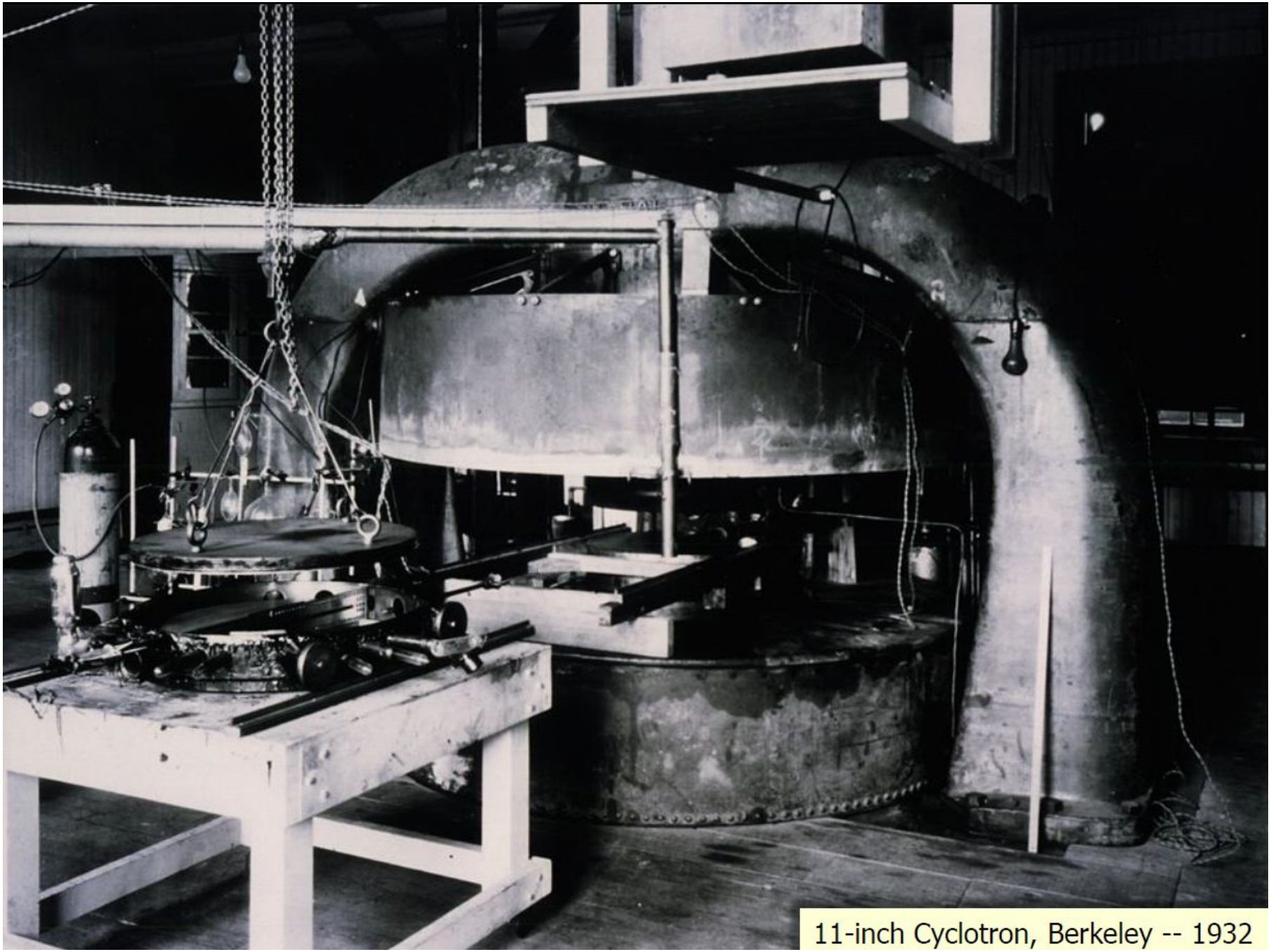
$$E_{\text{кін}} = 20\ \text{МеВ} = (\gamma - 1)mc^2 = \left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1\right) \cdot 938.3\ \text{МеВ} \quad \Rightarrow$$

$$\beta \approx \sqrt{\frac{20}{938+20}} = 0.1444$$

$$v = \frac{2\pi r}{T} = 2\pi r \cdot f_{\text{циклотрона}} \quad \Rightarrow$$

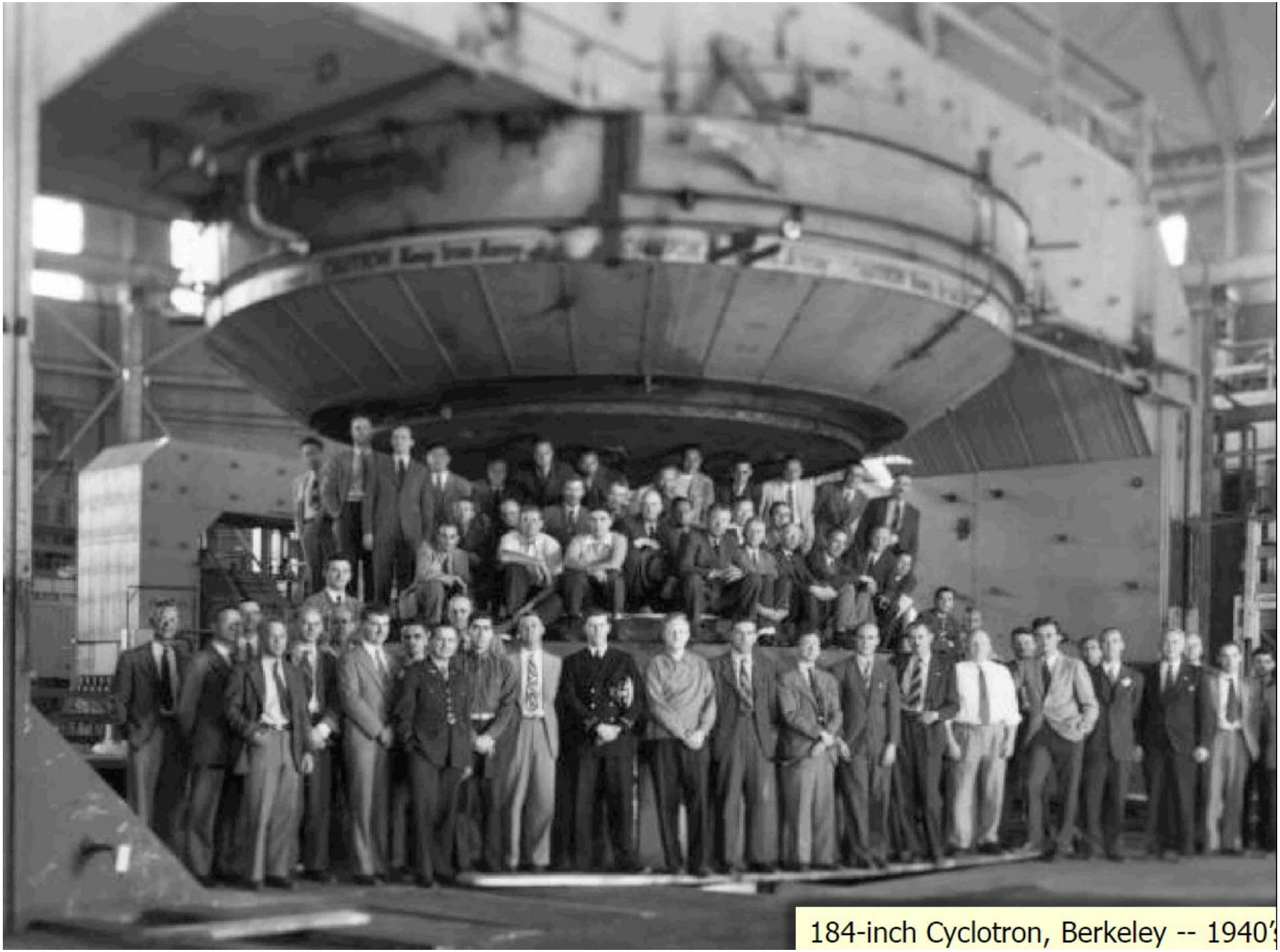
$$r = \frac{\beta c}{2\pi r \cdot f_{\text{циклотрона}}} = 0.636\ \text{м} \qquad \Leftarrow E_{\text{кін}} = 20\ \text{МеВ}$$

$$f_{\text{циклотрона}} = 15.244\ \text{МГц}$$



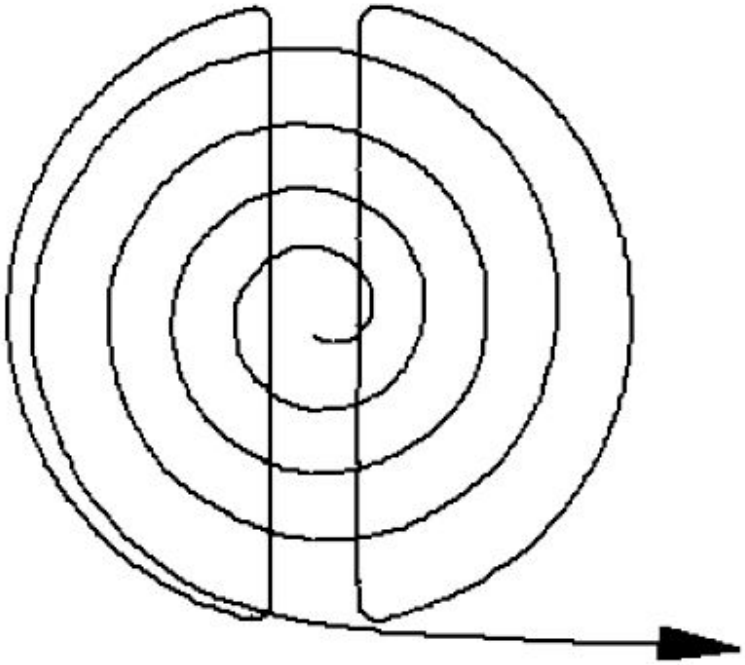
11-inch Cyclotron, Berkeley -- 1932

60-inch Cyclotron, Berkeley -- 1930's



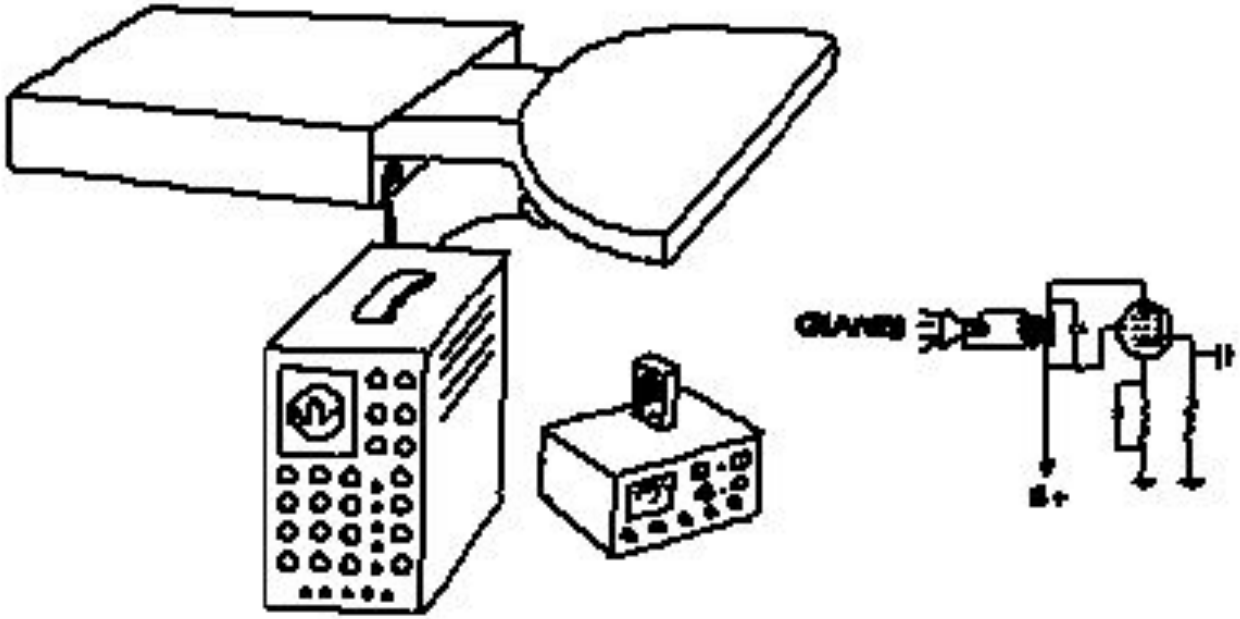
184-inch Cyclotron, Berkeley -- 1940's

Трохи фізичного

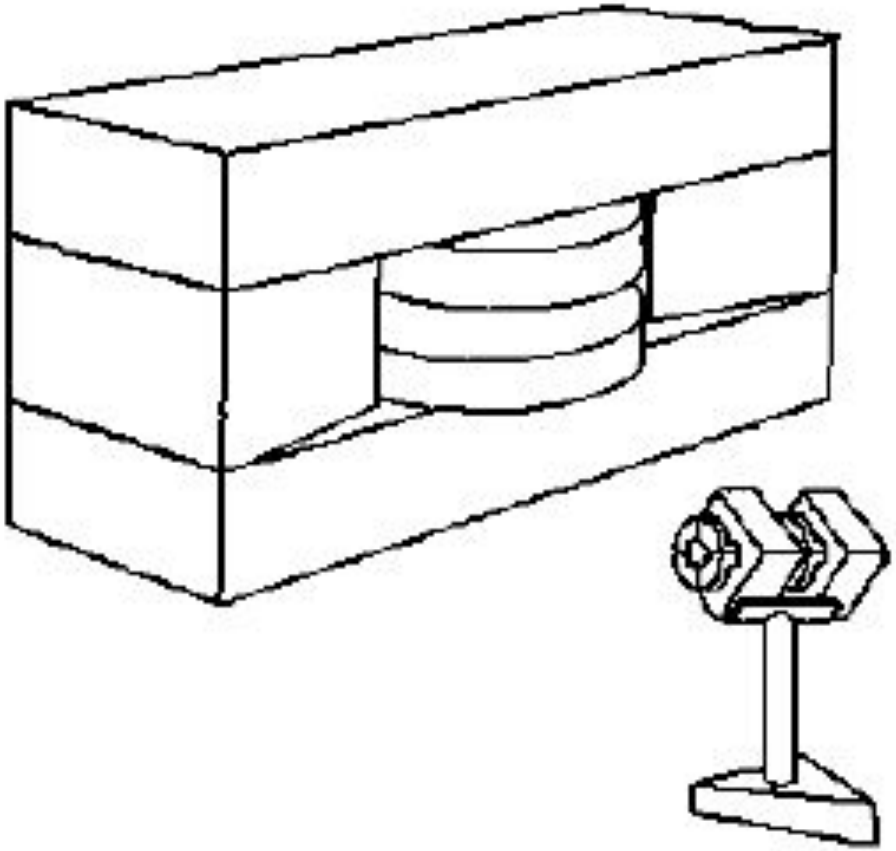


Так бачать циклотрон студенти-фізики

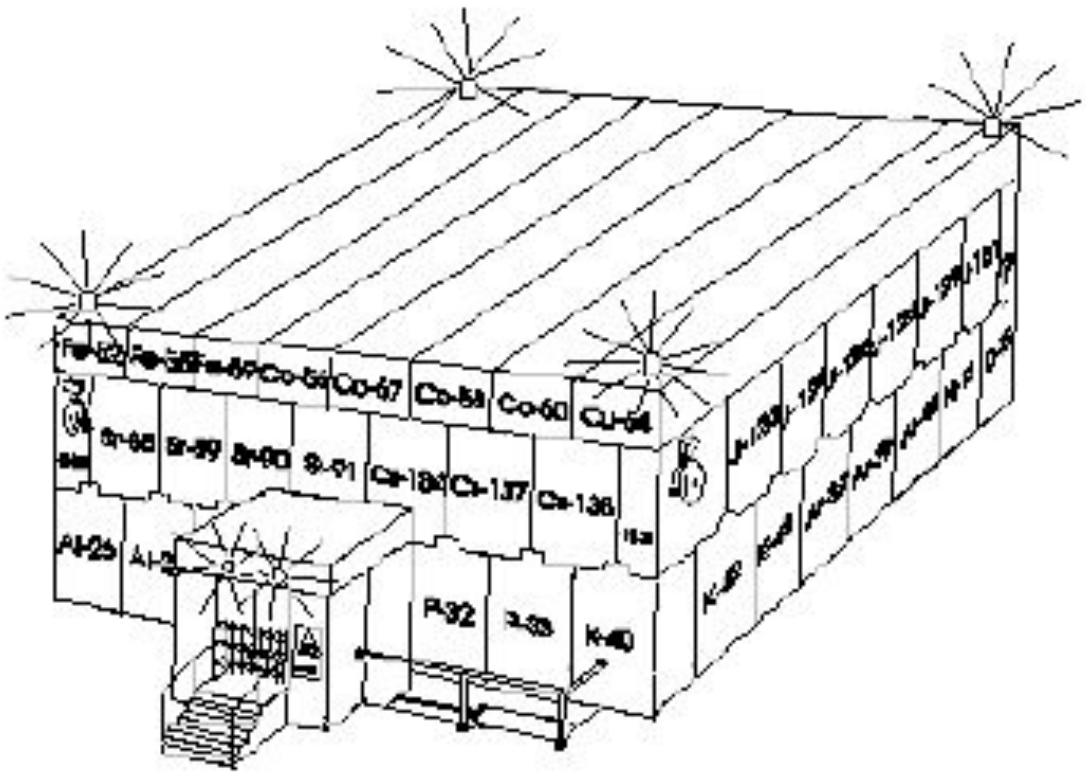
Так бачать циклотрон фізики - експериментатори в ФВЕ



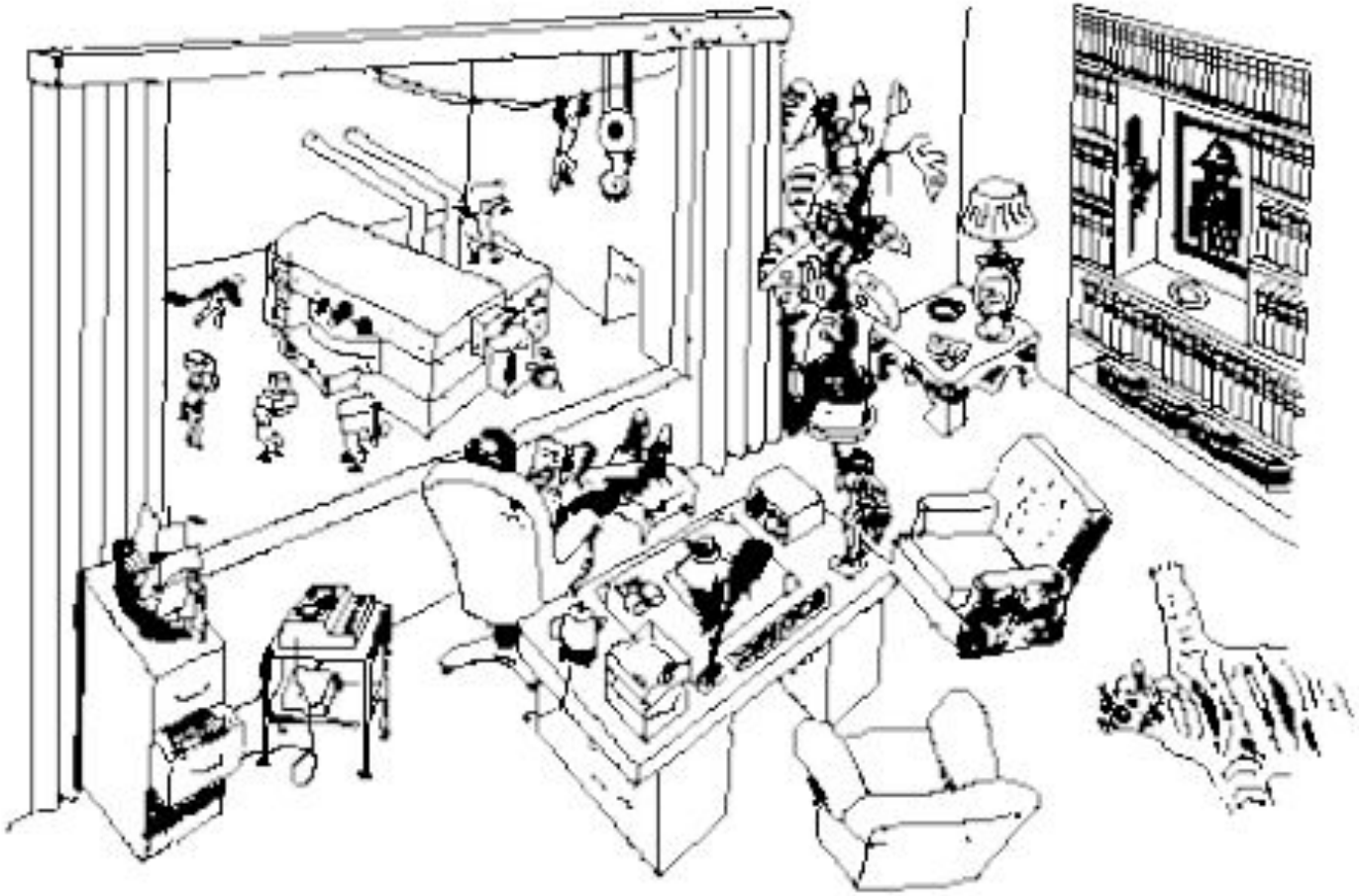
Так бачать циклотрон інженери-радіоелектронщики



Так бачать циклотрон інженери-механіки



Так бачать циклотрон спеціалісти служби радіаційної безпеки



А так бачить циклотрон
директор

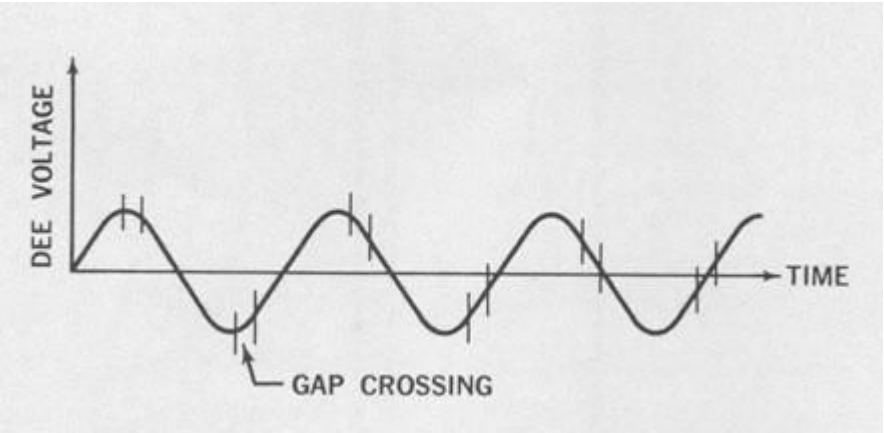
Релятивістське обмеження

Лоуренс побудував серію циклотронів в 30-х роках 20 сторіччя – найбільший з них 60-дюймовий Crocker Cyclotron в 1939 році. Він прискорював електрони до енергій 12 МеВ та альфа частинкидо 48 МеВ

$$f_{\text{циклотрона}} = \frac{1}{\gamma}\frac{eB}{2\pi m}$$

$$v = 16\% \cdot c$$

На 1% частота менша => за 25 циклів затримка на 25% => зсув в зону гальмування



Тому для електронів – циклотрон не ефективний (мала енергія спокою)

Ізохронний циклотрон

$$f_{\text{циклотрона}} = \frac{1}{\gamma}\frac{eB}{2\pi m}$$

$$r = \frac{\gamma m_0 v}{qB} \qquad B = \gamma B_0 \qquad r = \frac{m_0 v}{qB_0}$$

Магнітне поле збільшують в середньому з радіусом при збільшенні релятивістської енергії, при цьому для ефективного фокусування використовують складний закон поведінки магнітного поля по радіусу і по азимуту

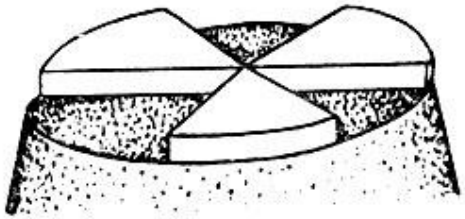
Одним із способів підвищення максимально енергії циклотрона є знаходження такої модифікації циклотрона, в якій період обертання частинки не залежить від її енергії. Якщо додатково зажадати при цьому сталості частоти прискорює напруги, то азимутально-симетричне магнітне поле має зростати з рад

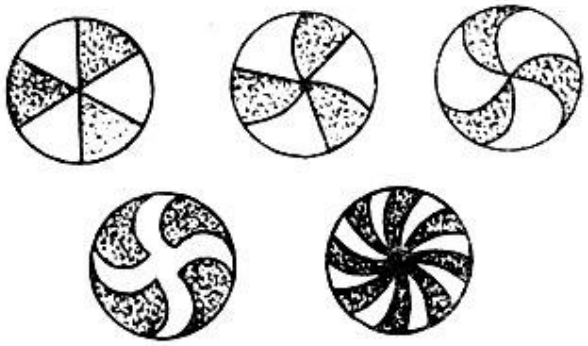
$$B(r) = \frac{B(0)}{\sqrt{1-(r/r_c)^2}}$$

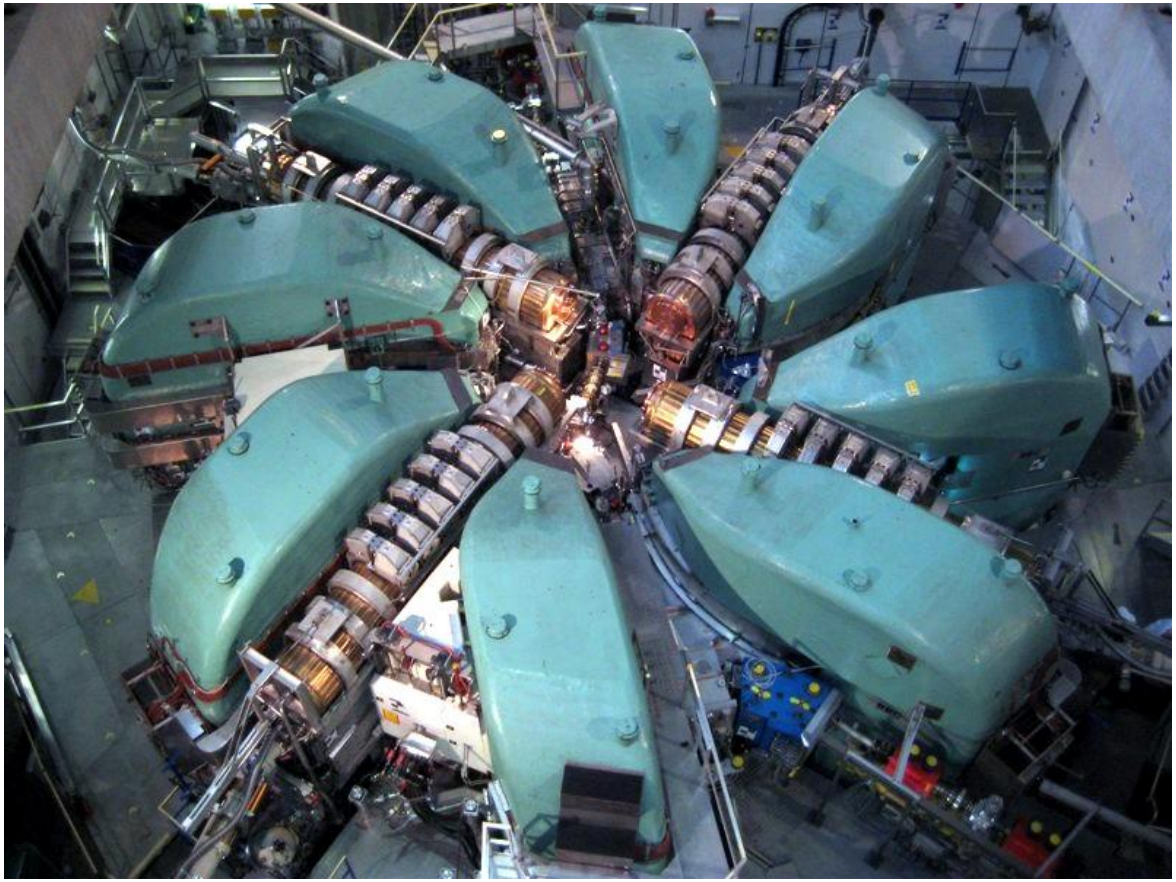
Але при такій поведінці поля не буде вертикального фокусування – для його забезпечення вводять азимутальну залежність поля.

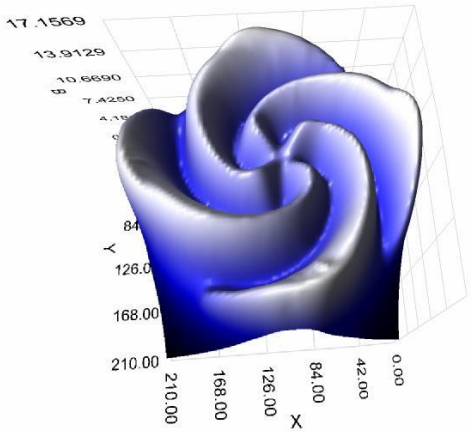
Вперше запропонував Американський вчений Томас. У 1938 році він показав, що при певній конфігурації магнітного поля орбіти заряджених частинок виявляються стійкими і ізохронними. Але популярною така схема циклотронів стала тільки у наші дні

Ізохронний циклотрон









Енергії протонів досягають порядку сотень МеВ

Фазотрон (синхроциклотрон)

$$f = \frac{f_0}{\gamma} = f_0\sqrt{1-\beta^2}$$

$$f_{\text{циклотрона}} = \frac{1}{\gamma}\frac{eB}{2\pi m}$$

Перший прискорювач в CERN – Синхроциклотрон, 600 МеВ, 1957

Надпровідний синхроциклотрон (TriNiobium Core™, Mevion)- 250 МеВ, діаметр 1.8 м. Для протонної терапії

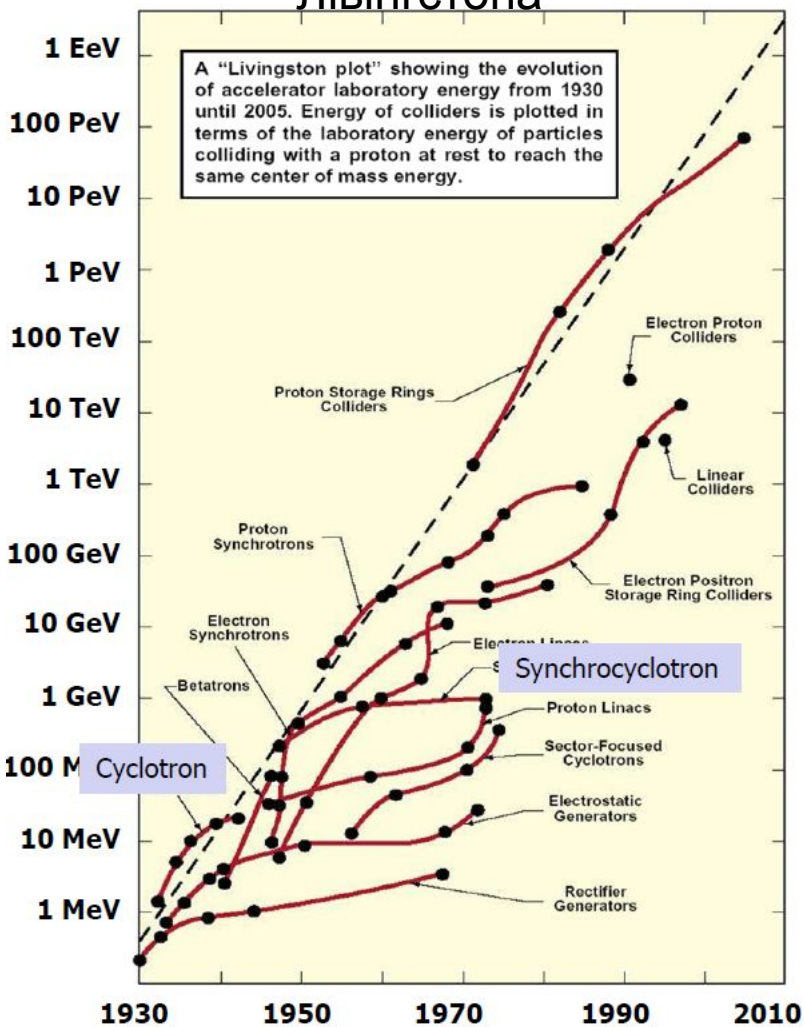
Енергії протонів досягають порядку сотень МеВ

Синхроциклотрон (фазотрон)

$$f_{\text{циклотрона}} = \frac{1}{\gamma}\frac{eB}{2\pi m}$$

$f_{\text{циклотрона}}$ зменшують при збільшенні релятивістської енергії

Графік Лівінгстона



Синхронізм при прискоренні

Прості теоретичні розрахунки приводили до кількості частинок, які попадали в режим прискорення із зміною частоти, яка прямувала до нуля.

Групування частинок в банч для прискорення забезпечується принципом автофазування, яке відкрили

Радянський вчений В.І. Векслер в 1944 році
і незалежно
Американський вчений Е.Макмілліан у 1945 році

Синхронізм при прискоренні

Ідея принципу автофазування полягає в тому, що для компенсації збільшення періоду обертання частинок, що веде до порушення синхронізму, змінюють

або частоту прискорюючої електричного поля,
або індукцію магнітного поля,
або те й інше.

Принцип автофазування використовується в:

- **Ізохронному циклотроні**
- **Фазотроні (синхроциклотроні),**
- **Синхротроні,**
- **синхрофазотроні.**

Синхротрон

Синхротрон - один з типів резонансних циклічних прискорювачів. Характеризується тим, що в процесі прискорення частинок орбіта пучка залишається постійного радіуса, а магнітне поле поворотних магнітів на цьому радіусі зростає.

Крім того, залишається постійною частота прискорюючого електричного поля (для електронів v=c)

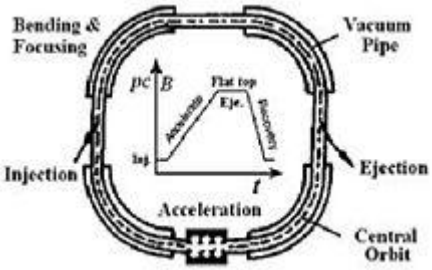
$$f = \frac{1}{\gamma}\frac{eB}{2\pi m_0}$$

$$r = \frac{mv}{qB}$$

Перший синхротрон (електронний) побудовано в США (Edwin McMillan) – 1944 рік

LEP – більше 100 ГеВ

Енергії електронних синхротронів – до сотень ГеВ



Синхротрон (Синхротронне випромінювання)

$$\Delta W \sim a^2 .$$

Втрати енергії на радіаційне випромінювання за один оберт

$$\Delta W = \frac{4\pi}{3}\frac{e^2}{R}\left(\frac{E}{m_e c^2}\right)^4 \qquad \Delta W\ [\text{кэВ/об.}] = 90\frac{E^4\ [\text{ГэВ}]}{R\ [\text{м}]}$$

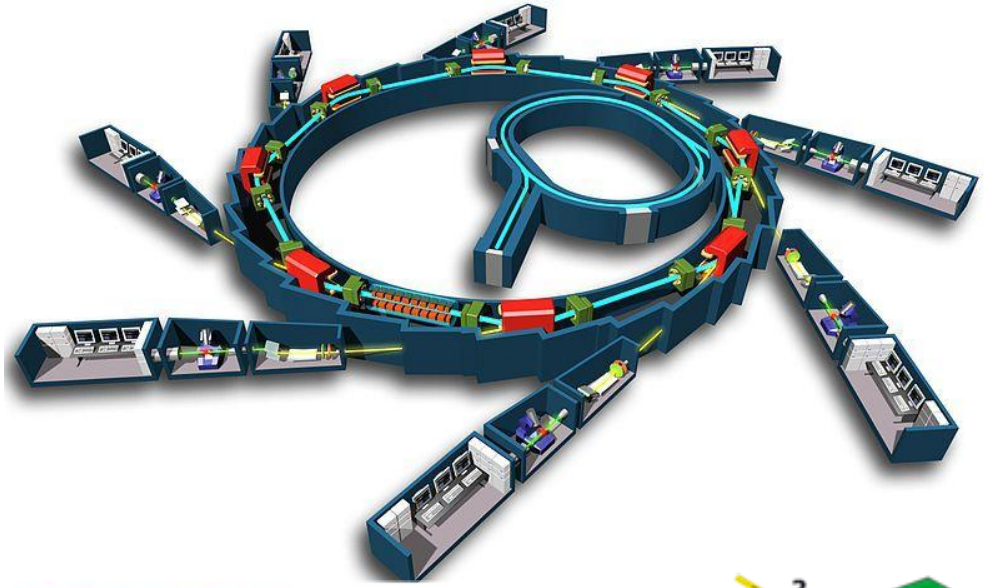
E – повна ен

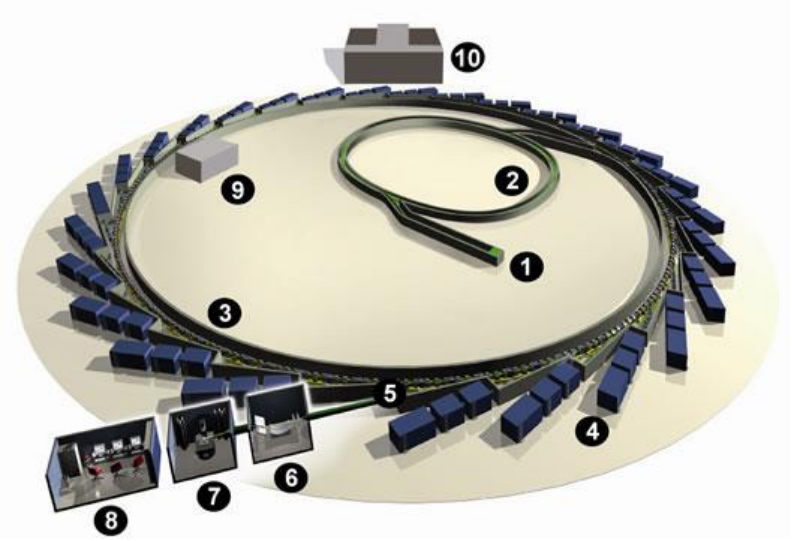
$$\Delta W \sim \frac{1}{m_e^4}$$

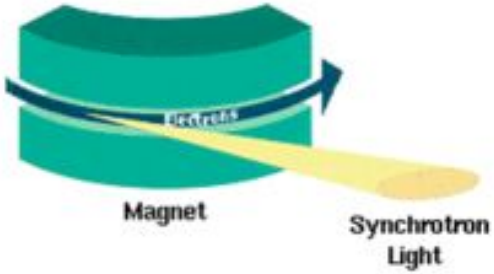
 Актуально тільки для електронів

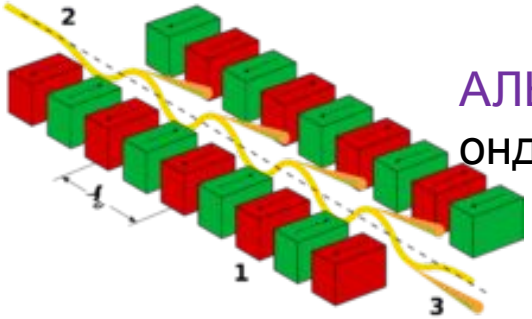
Синхротрон (Синхротронне випромінювання)

Soliel, Saclay (Paris)









АЛЬТЕРНАТИВА - ондулятори

Синхрофазотрон (Протонний синхротрон зі слабким фокусуванням)

Синхрофазотрон – головний тип сучасних резонансних циклічних прискорювачів. Характеризується тим, що в процесі прискорення частинок орбіта пучка залишається постійного радіуса, а магнітне поле поворотних магнітів на цьому радіусі зростає.

Крім того, змінюється частота прискорюючого електричного поля (для важких частинок - протонів, ядер)

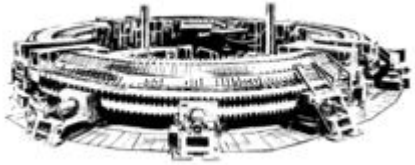
$$f = \frac{1}{\gamma}\frac{eB}{2\pi m_0}$$

$$\boxed{r = \frac{mv}{qB}}$$

http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/e96/PAPERS/ORALS/FRX04A.PDF

Перший в світі – Космотрон, США, БНЛ, 1952, 3 ГеВ,
Бермінгемський протонний синхротрон (1953 р., Марк Оліфант, 1 ГеВ)
Синхрофазотрон ОІЯД – 1957 р., 10 ГеВ (в 2002 році зупинено)

Історія великих прискорювачів

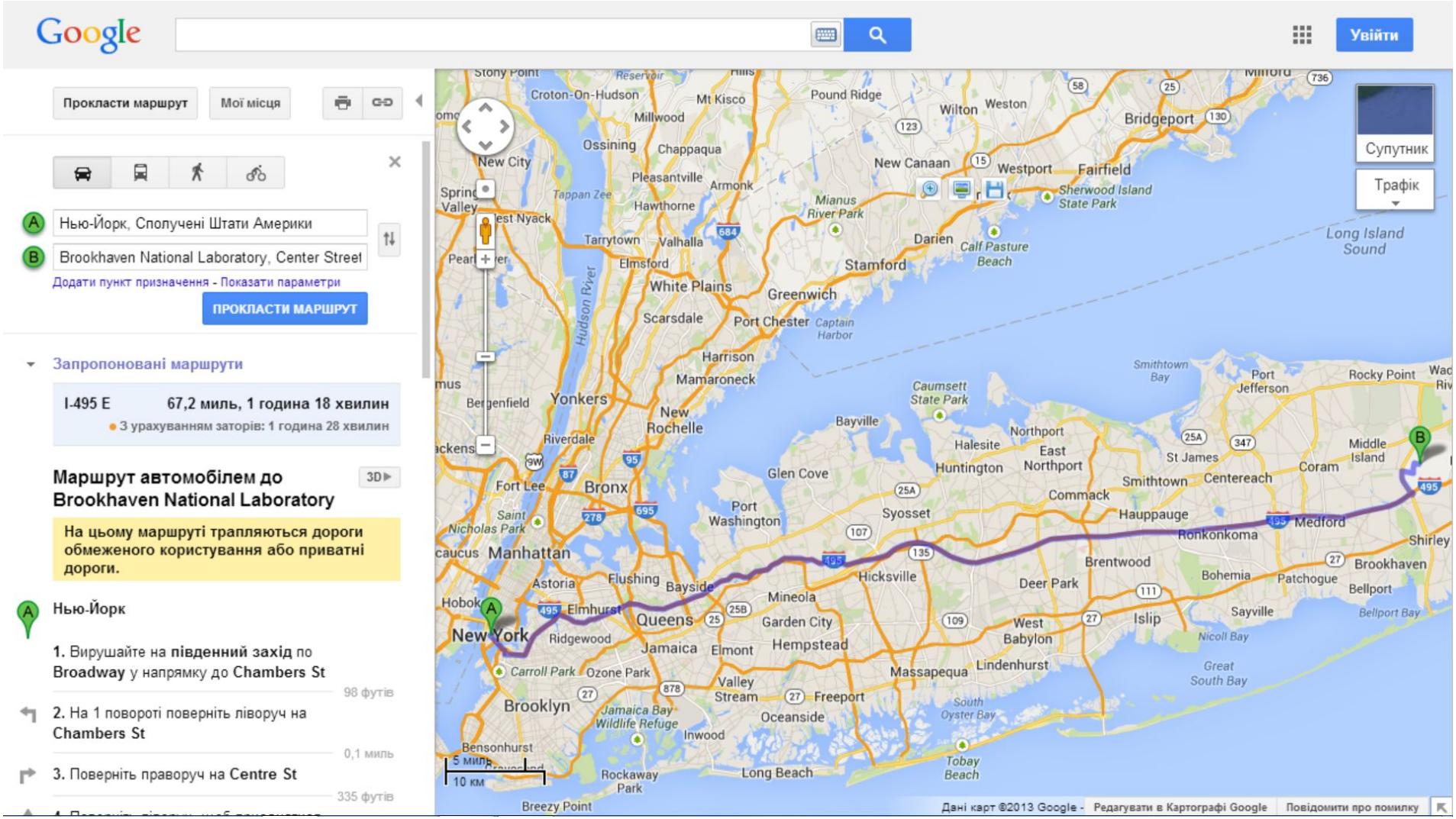


Cosmotron

Протонний синхротрон із слабким фокусуванням,
BNL (Brookhaven National Laboratory), USA
1952 (1953, повна енергія) – 1966 (1969, демонтований), 3.3 ГеВ

Вперше продукувалися – усі типи мезонів, які були відомі з дослідження космічних променів, K0L мезони, перші векторні мезони

BNL (Brookhaven National Laboratory), USA



RHIC

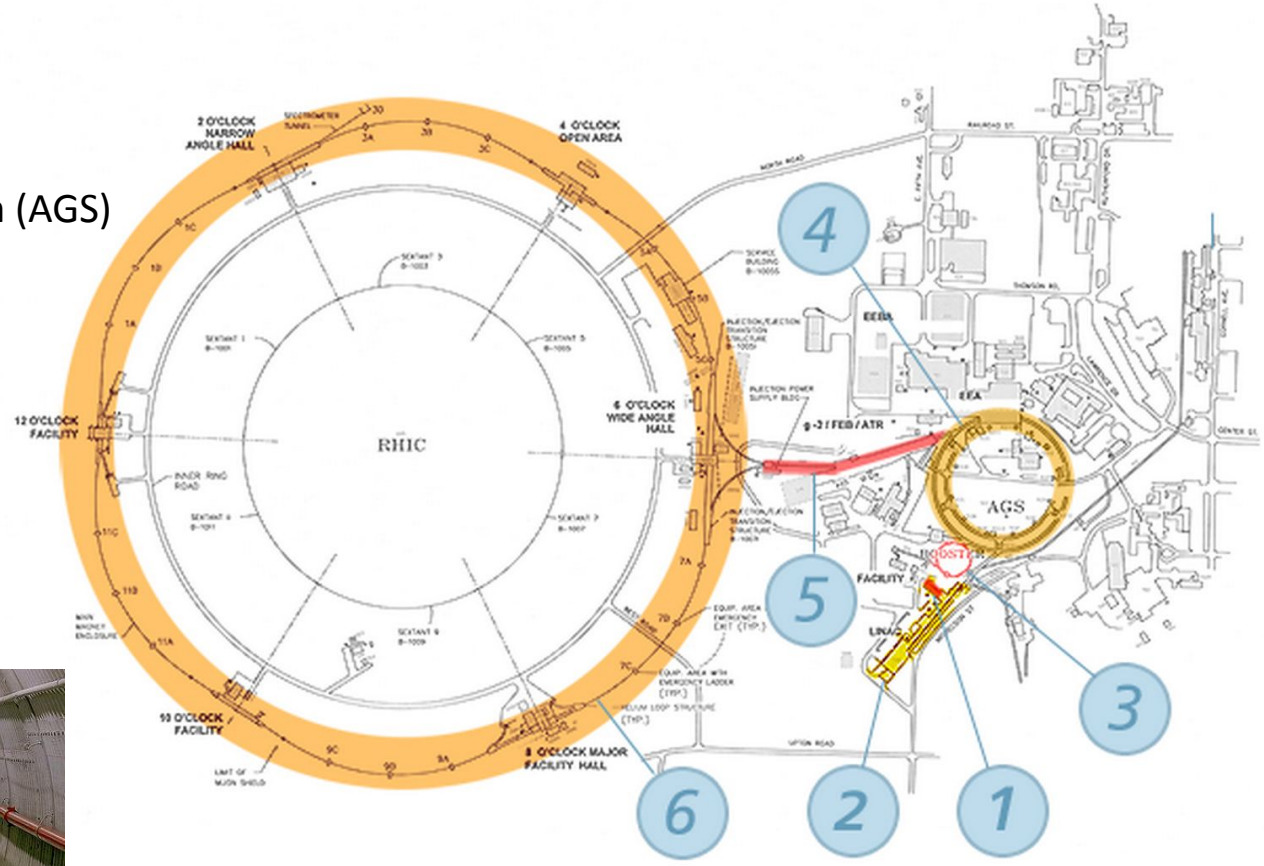
(Relativistic Heavy Ion Collider)

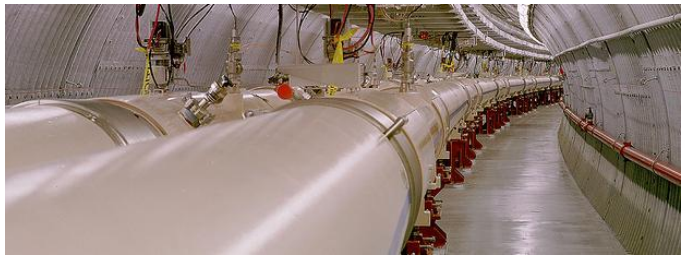
BNL (Brookhaven National Laboratory), USA

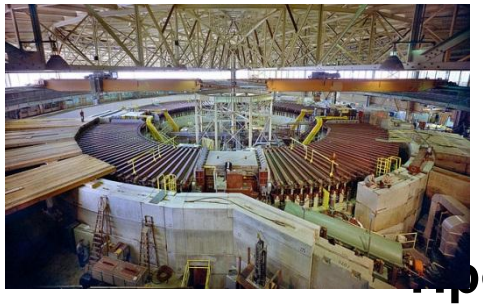
Коллайдер з накопичувальними кільцями, які перетинаються, прискорює протони і важкі іони, довжина кілець 3834 метри, надпровідні магніти (диполі 3.45 T)

1 -- Electron Beam Ion Source (EBIS)
2 – Linac
3 -- Booster
4 -- Alternating Gradient Synchrotron (AGS)
5 – Beamline
6 -- two rings of RHIC

Au+Au – 200 ГеВ на нуклонну пару в системі центру мас



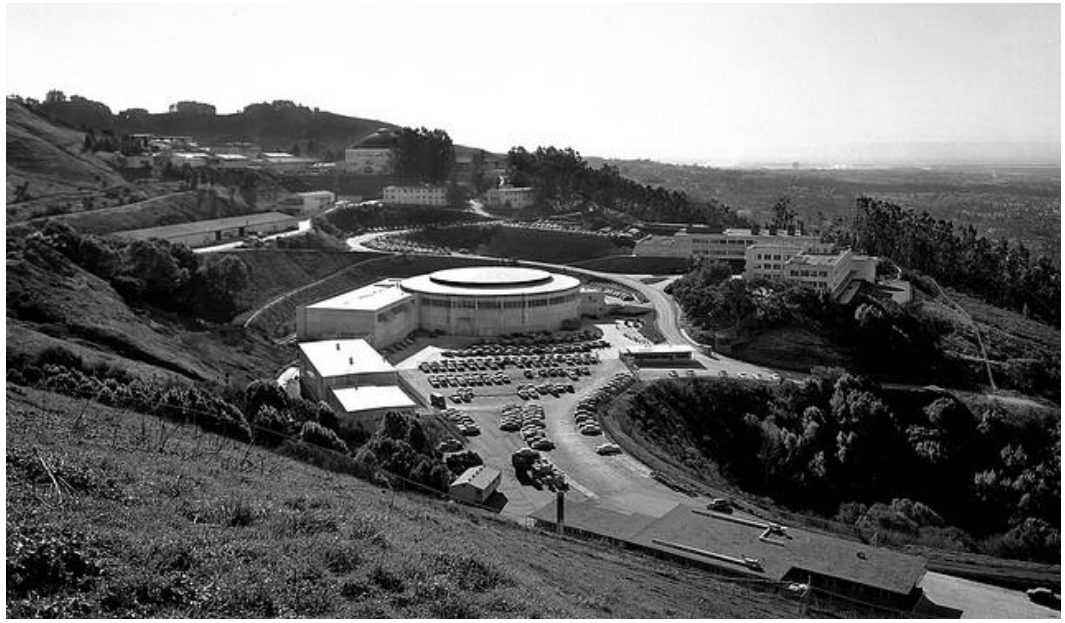




Bevatron

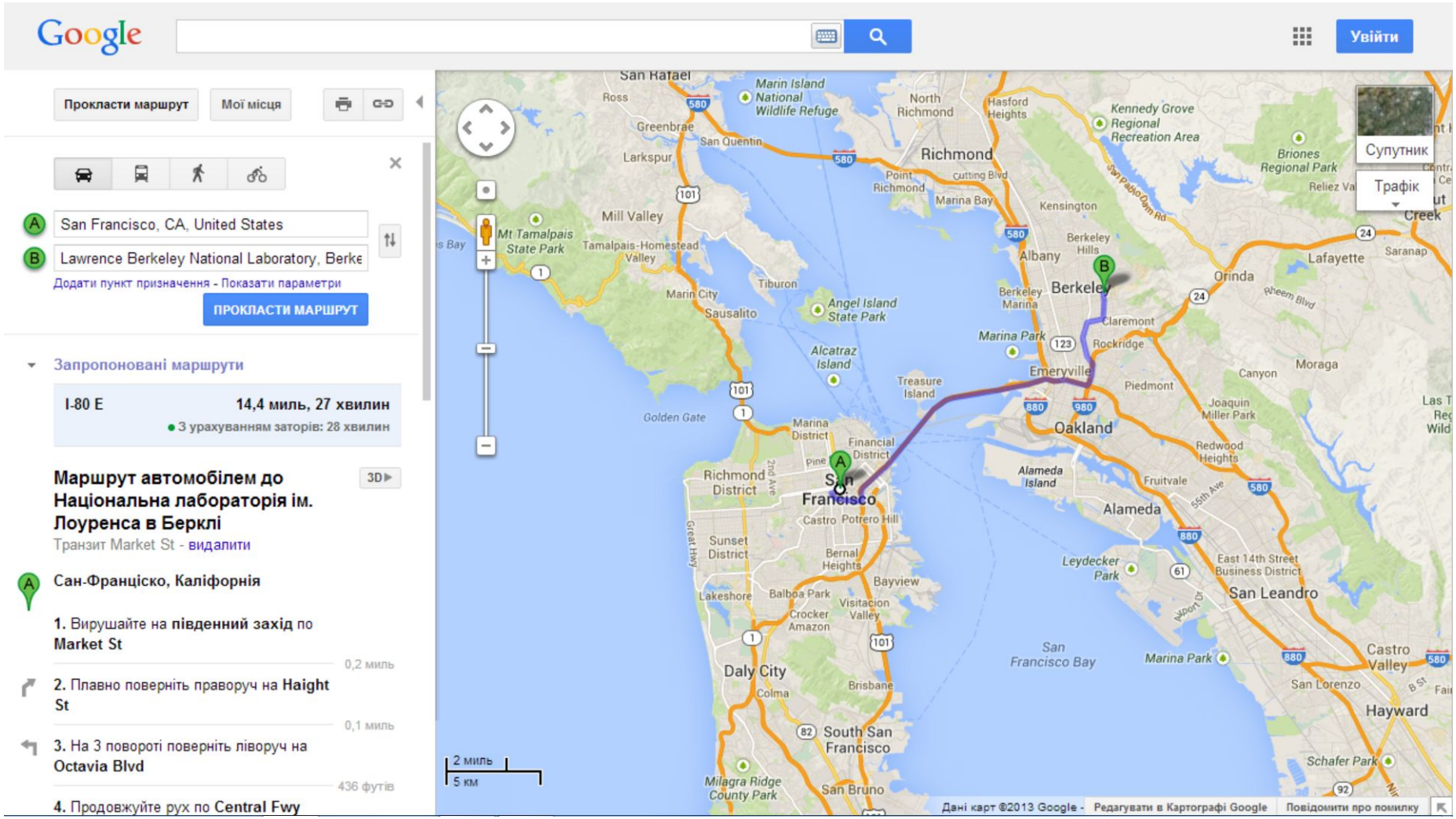
Протонний синхротрон із слабким фокусуванням,
LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory), USA, Каліфорнія
1954 – 1971, 6 ГеВ
1971-1993 – як бустер важких іонів
для лінійного прискорювача
SuperHILAC (Super Heavy Ion Linear Accelerator),
Bevatron+SuperHILAC=Bevalac
2009-2011 - демонтаж

Вперше зареєстровані антипротони в 1955 році – Нобелівська премія (Еміліо Сегре та Оуен Чемберлен, 1959 р.) , використовувалися бульбашкові камери з рідкого водню (Луїс Альварес, Нобелівська премія 1968 р., за відкриття резонансів з використанням бульбашкової камери)



LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory), USA, Каліфорнія

Berkeley Lab



Історія великих прискорювачів

Станфордський лінійний прискорювач

Радіочастотний лінійний прискорювач електронів, SLAC (SLAC National Accelerator Laboratory (з 2008 р.), стара назва - Stanford Linear Accelerator Center), USA

1966 (22 ГеВ повна енергія) – …,

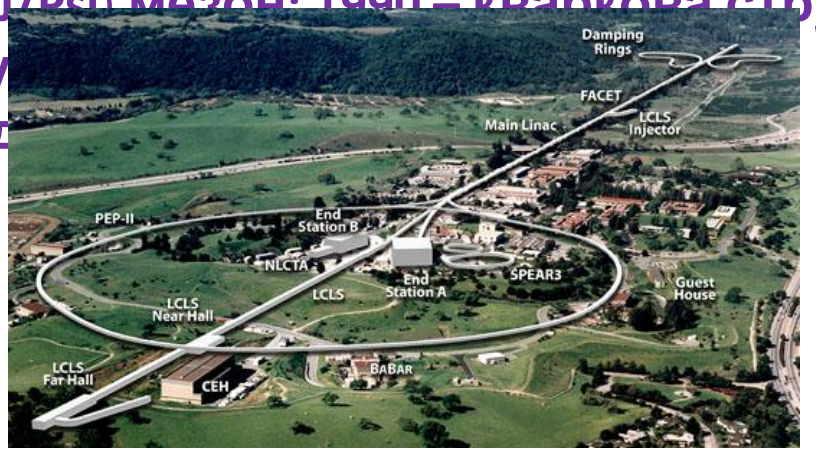
50 ГеВ для електронів і позитронів, в режимі колайдера в СЦМ енергія 90 ГеВ

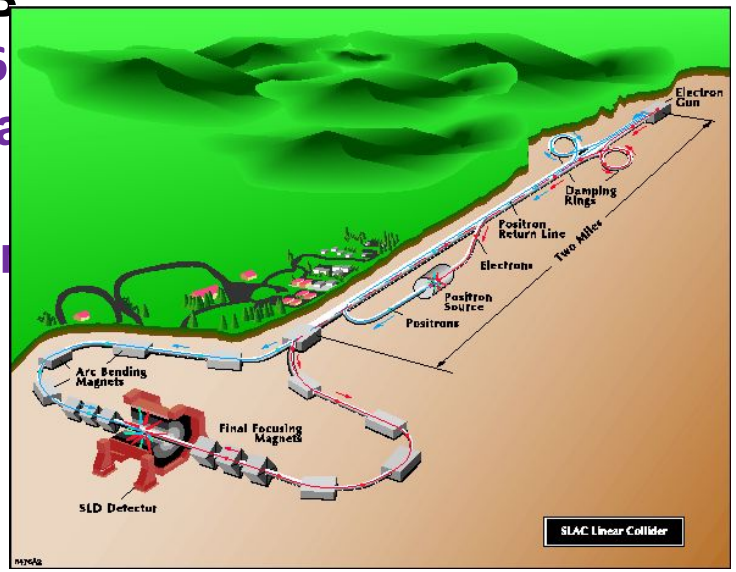
Продукувалися 3 нобелівські премії: 1976

J/ψ (J/Psi) мезон: 1990 – кваркова структура

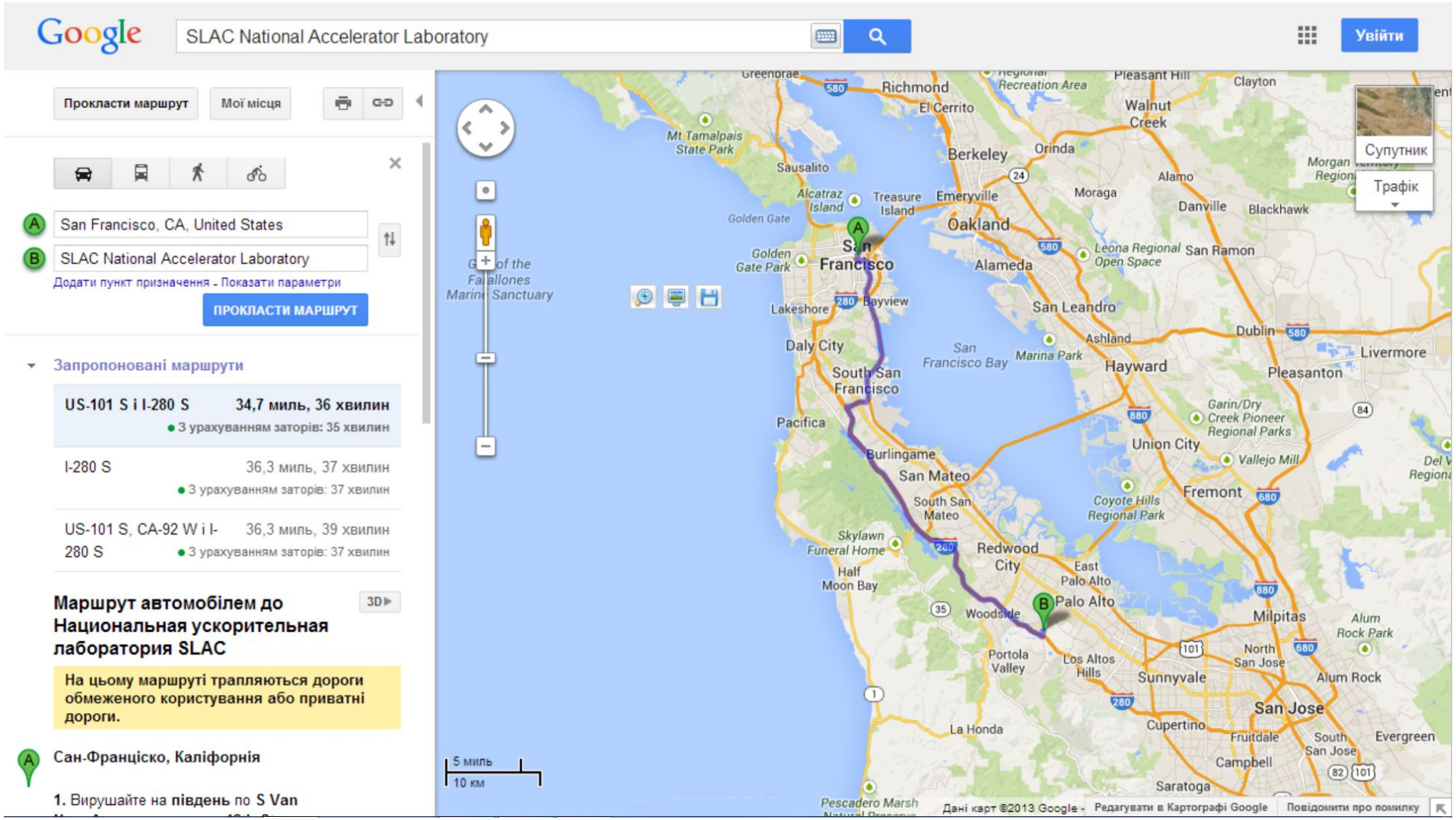
– тау

Найд - 3.2 к





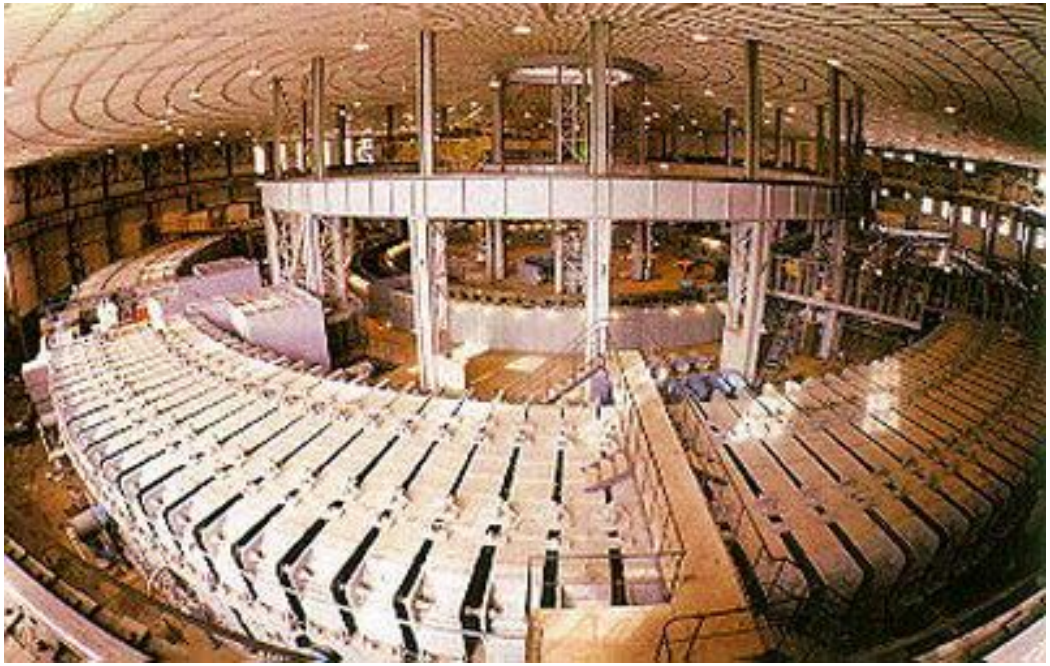
SLAC (SLAC National Accelerator Laboratory)



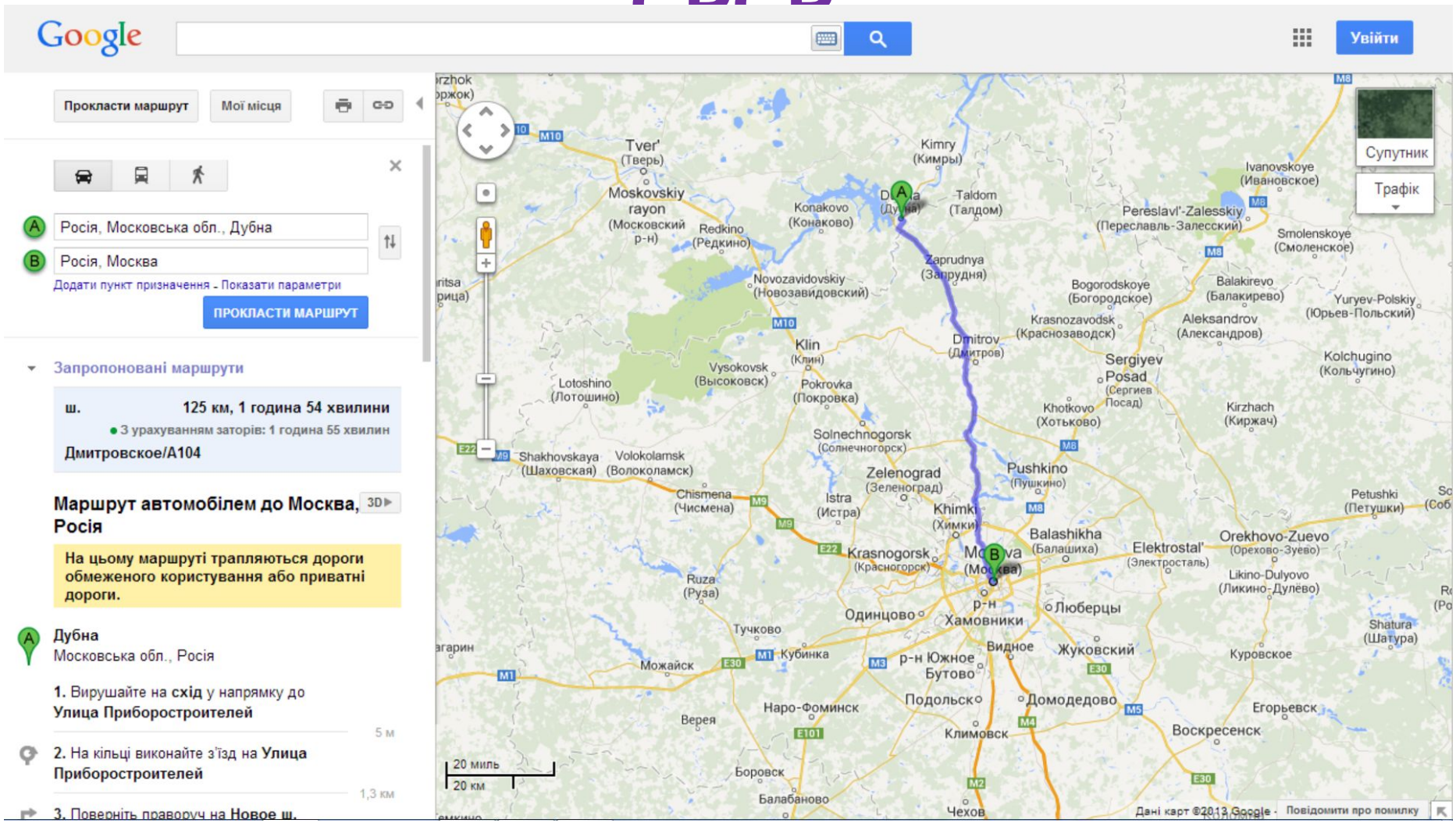
Історія великих прискорювачів

Синхрофазотрон, Дубна, СРСР

Протонний синхротрон, Дубна, СРСР
1957 (повна енергія) – 2002, 10 ГеВ



Синхрофазотрон, Дубна, СРСР



Історія великих прискорювачів

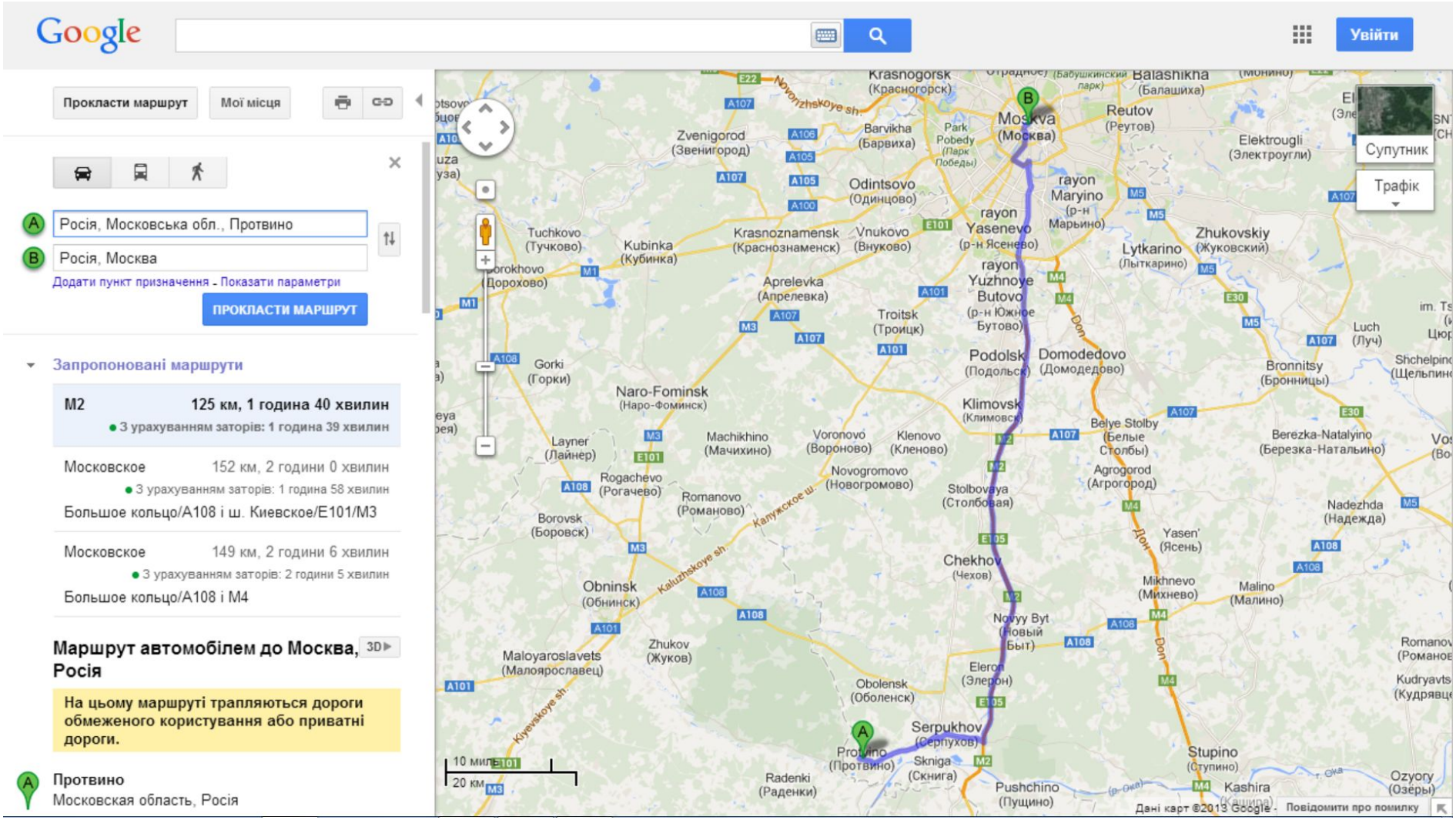
Синхрофазотрон У-70, Протвино (біля Серпухова), СРСР

Протонний синхротрон, Протвино, СРСР

http://www.liveinternet.ru/showjournal.php?journalid=1109359&tagid=82941

1967 (повна енергія 76 ГеВ) – …, 70 ГеВ

Протвино (біля Серпухова)

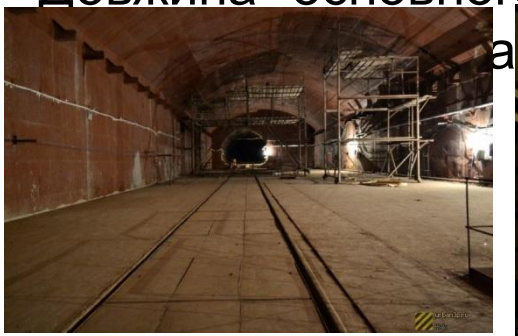


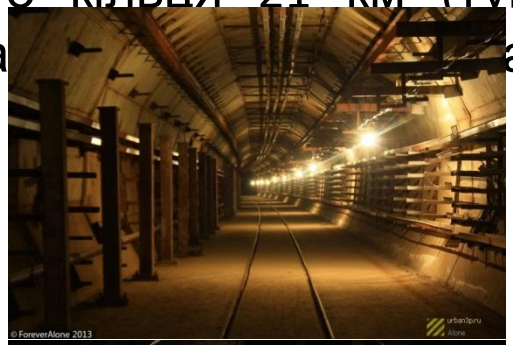
Історія великих прискорювачів

Протвино

Примари СРСР – руїни недобудованого суперколайдера на 3000 ГеВ (УНК – «ускорительно-накопительный комплекс») (1983 - 1994)

Довжина основного кільця 21 км (тунель повністю прорито). У-70



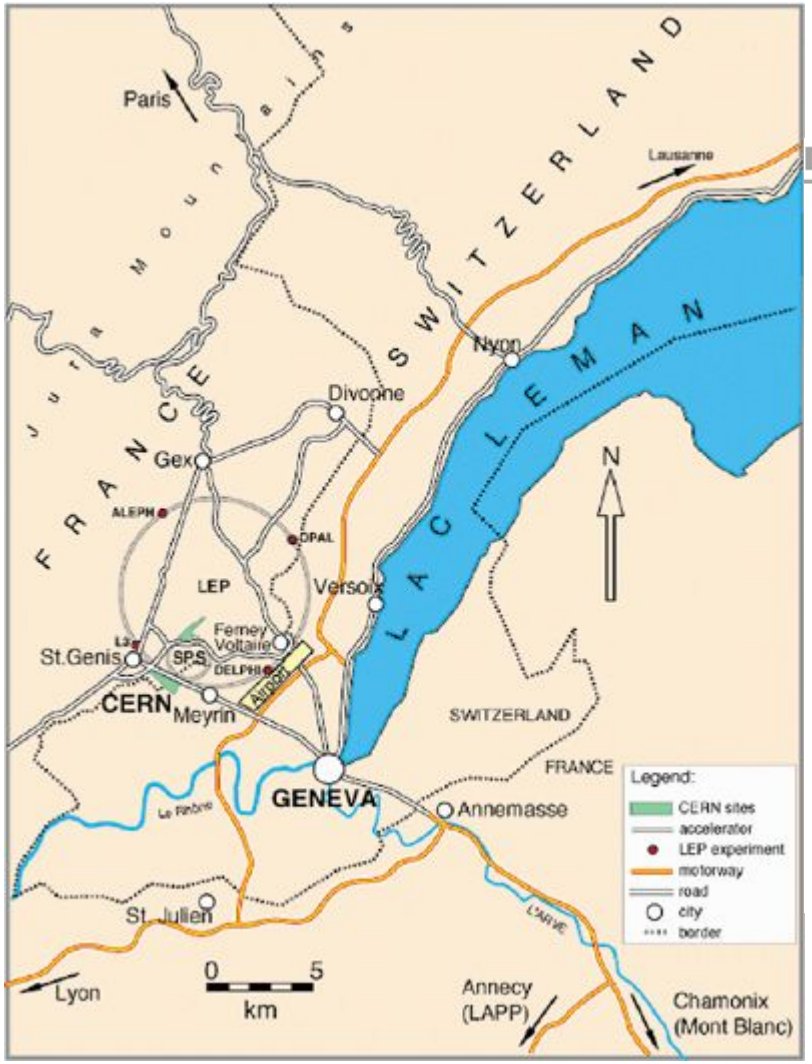


Історія великих присвоювачів

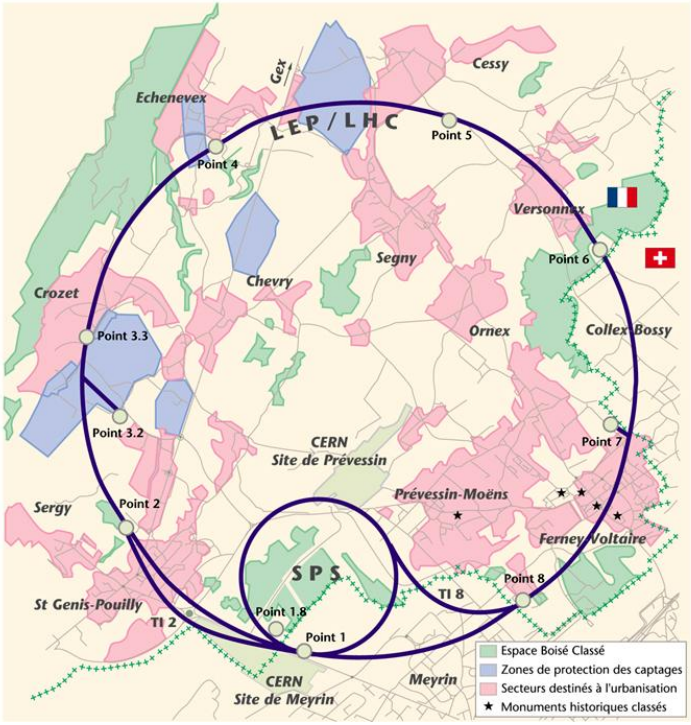
ЦЕР

Історія великих прискорювачів

ЦЕРН



Principales zones d'occupation des sols à proximité du LEP

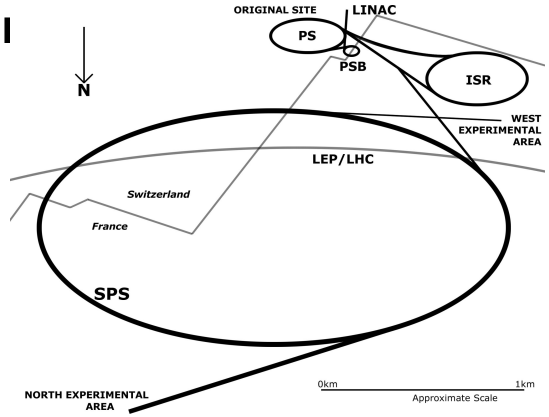


CERN AC - EI6-35 - 03 1997

Протонний синхротрон, 28 ГеВ (Proton Synchrotron), CERN

1959 – …, 28 ГеВ, довжина кола 628.3 м

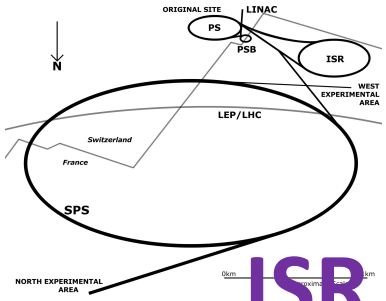
Давно використовується як бустер для більш потужних прискорювачів



1. Intersecting Storage Rings (ISR)
2. Super Proton Synchrotron (SPS)
3. Large Electron-Positron Collider (LEP)
4. Large Hadron Collider (LHC)

Універсальна машина – може прискорювати протони, антипротони, електрони, позитрони і деякий набір іонів, інтенсивність збільшили з 1959 року в 1000 раз

Відкрито слабкі нейтральні струми в 1974



Адронний коллайдер, ISR (Intersecting Storage Rings), CERN

1971 – 1984,
Перший в світі адронний колайдер
Максимальна енергія протонів у ISR - 31.5 ГеВ, в системі центру мас 62 ГеВ
Висока світимість для p-p зіткнень – в 1984 р. Отримано $1{,}4\times10^{32}$см$^{-2}$с$^{-1}$

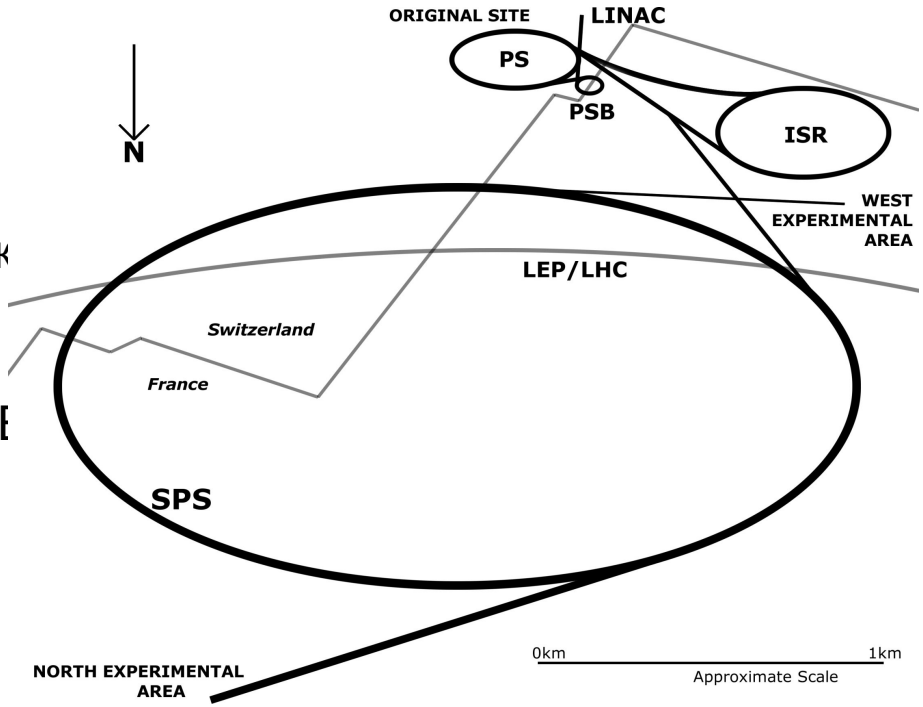
В основному працював в режимі протон-протонного коллайдера, а також протон-антипротонних зіткнень, використання дейтронних пучків

Розробка стахастичного охолодження - Симон Ван дер Меер, в 1984 Нобелівська премія

Супер Протонний Синхротрон, SPS (Super Proton Synchrotron), CERN

1976 – ...,
довжина кола 6.9 км, максимальна енергія 400 ГеВ
1981-1984 – як протон-антипротонний колайдер – назва $Sp\bar{p}S$

Прискорював протони, антипротони, електрони, позитрони (як інжектор для LEP - Large Electron–Positron Collider) і важк іони, зараз виступає фінальним інжектором для LHC (розганяє високоінтенсивні пучки протонів з 26 ГеВ до 450 ГеВ)



1983: знаходження W та Z бозонів (Нобелівська премія 1984 року)
1999: відкриття прямого порушення CP інваріантності

Великий електрон-позитронний коллайдер,

LEP (Large Electron-Positron Collider), CERN

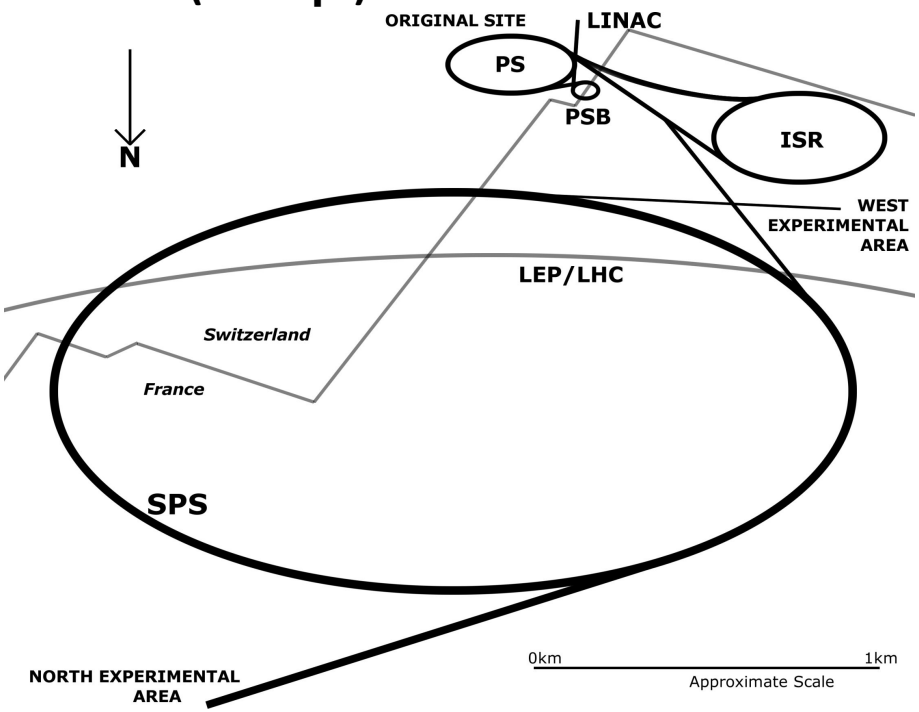
1989 - 2000,

довжина кола 27 км,

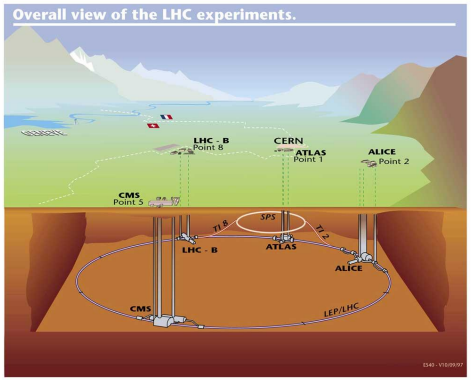
максимальна енергія електронів і позитронів - 45 ГеВ (1989 р.),

Сумарна енергія - 209 ГеВ (2000 р.)

Уточнювалися характеристики Стандартної моделі



Історія великих прискорювачів



LHC, CERN

Історія прямо зараз

Історія великих прискорювачів

ТЕВАТРОН
Tevatron, USA, Батавія, Фермілаб

1983 - 2011,

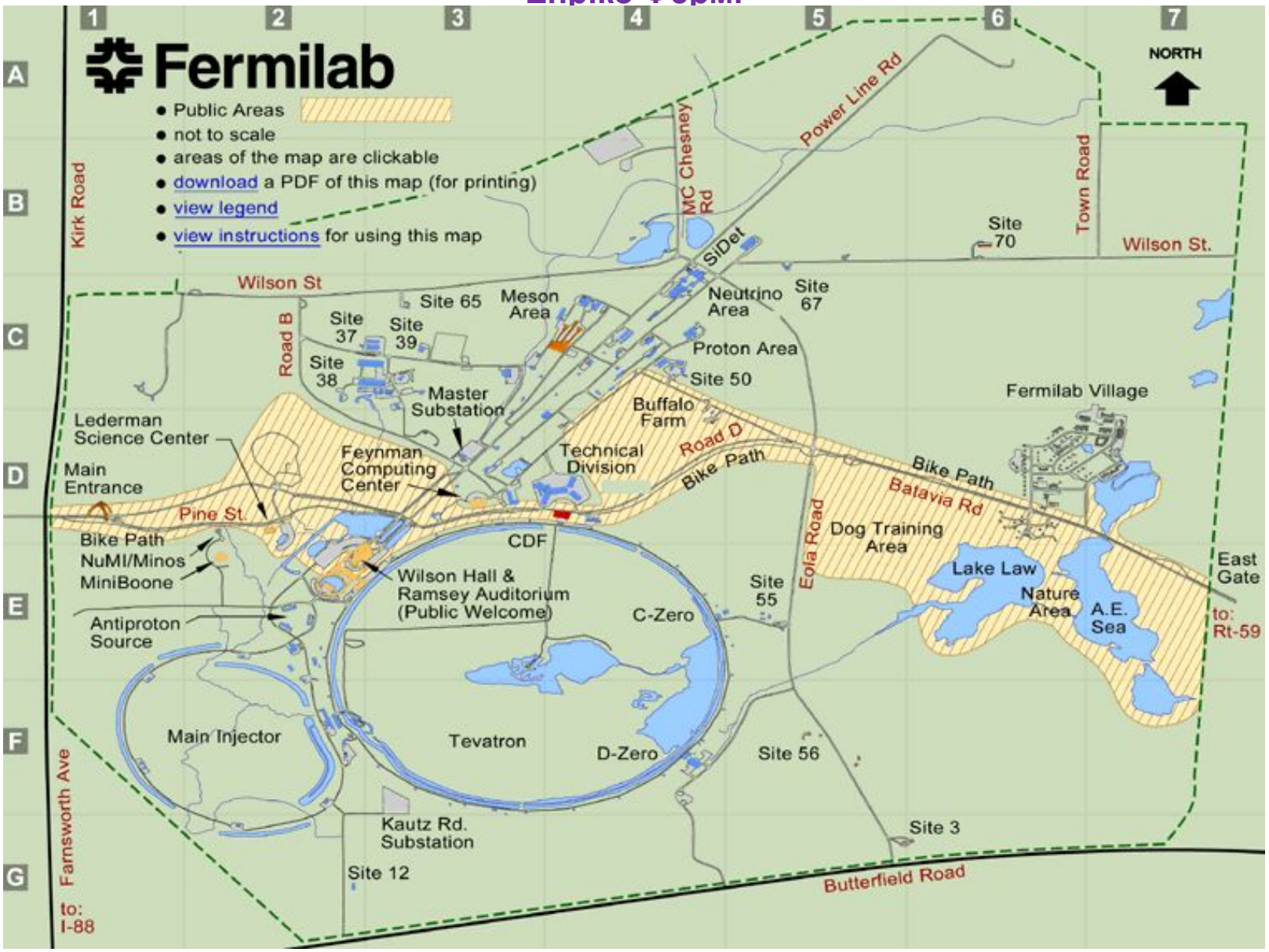
Синхротрон, колайдер, довжина кола 6.3 км,
максимальна енергія - 980 ГеВ для кожного пучка,

Прискорює протони і антипротони

1995: відкриття t-кварка
1996: отримання атомів антиводню
1998: відкриття $B^{+}{}_{c}$ мезона
…

Фермілаб

Національна прискорювальна лабораторія імені Енріко Фермі



Фермілаб

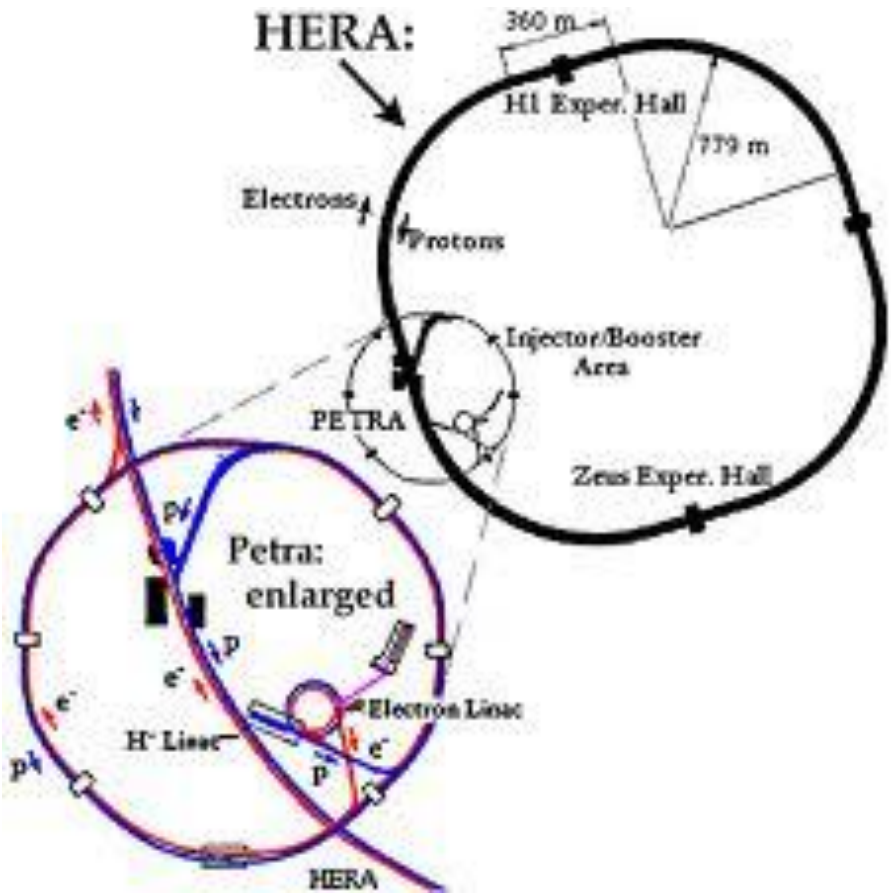
Національна прискорювальна лабораторія імені

HERA

Hadron-Elektron-Ring-Anlage (Hadron Electron Ring Facility), DESY(*Deutsches Elektronen-Synchrotron*), Гамбург

Два кільця: електрони – 27.5 ГеВ, протони – 920 ГеВ

Кільце довжиною більше 6 км



МІКРОТРОН

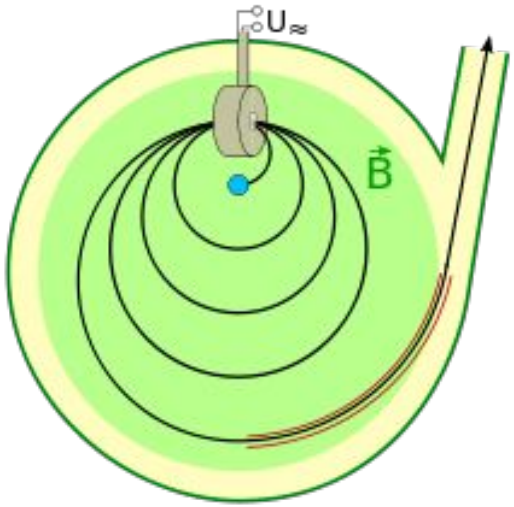
Класичний мікротрон, ідея якого була запропонована в 1944 році Векслером, являє собою круглий дипольний магніт, але на відміну від циклотрона частинки инжектуються не в центрі, а скраю, де встановлені порожнисті прискорюючі електроди. Далі частинки рухаються по колах все більшого радіуса, отримуючи на кожному обороті прирощення енергії таке, щоб нова частота обертання знову була кратна частоті ВЧ-системи.

На 1 оберт порядку 0.5 МеВ приріст енергії

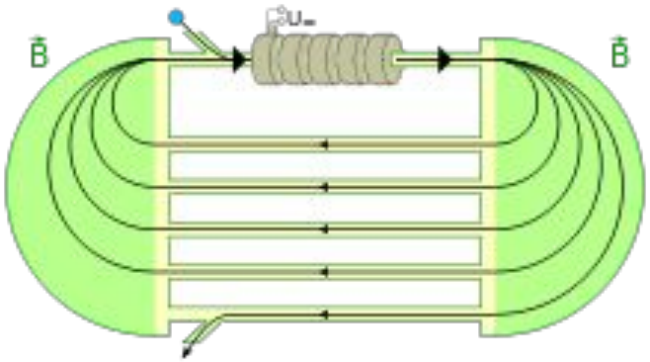
$$T = \frac{2\pi m}{qB} = \frac{2\pi m v}{qBv}$$

$$T = \frac{2\pi m}{qB} = \frac{2\pi p}{qBc} = \frac{2\pi E/c}{qBc}$$

$$\mathrm{T} = \frac{2\pi E}{qBc^2}$$

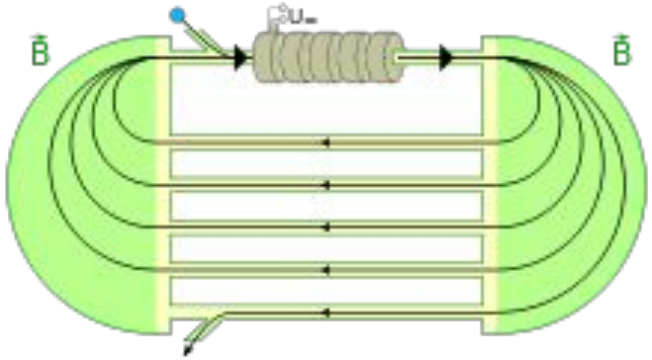


Класична схема

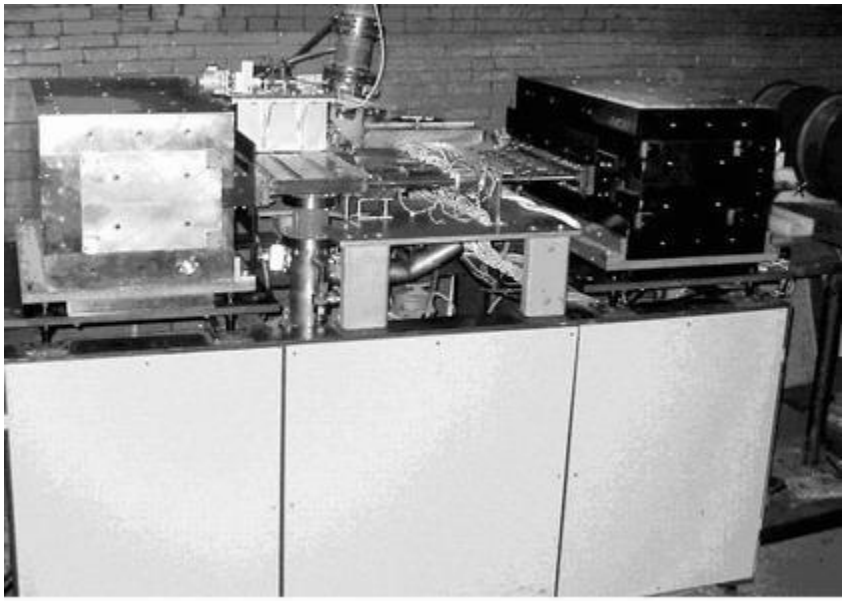


Розрізний мікротрон

РОЗРІЗНИЙ МІКРОТРОН



Розрізний мікротрон РАМ-55

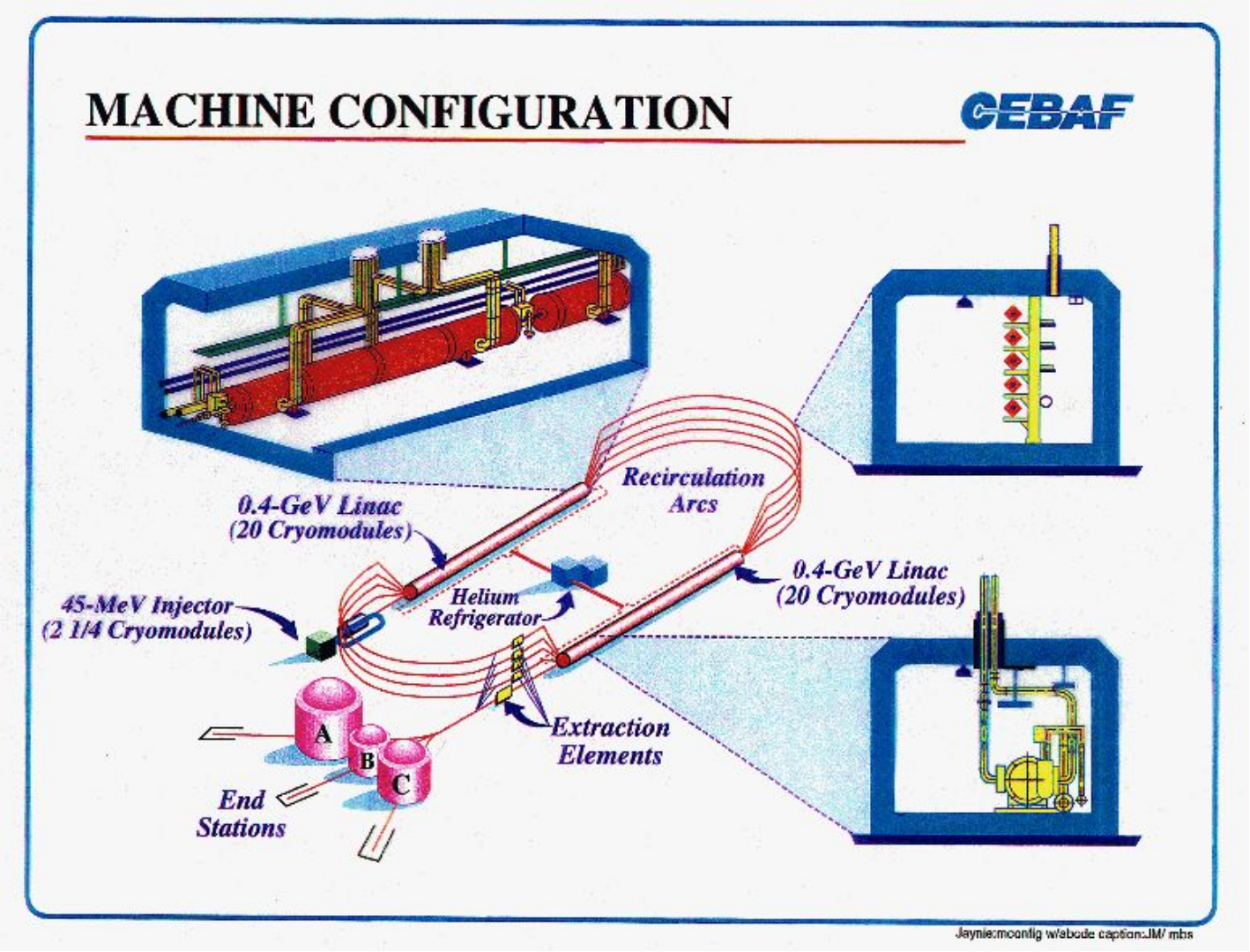


Імпульсний розрізний мікротрон на енергію 70 МеВ (НДІЯФ МДУ)

Прискорювач електронів неперервної дії на принципі квазімікротрона,

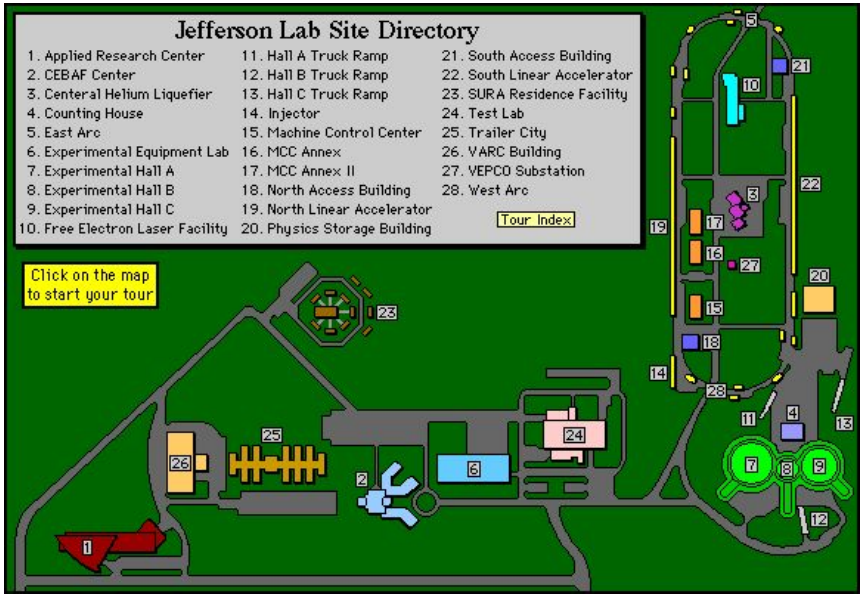
CEBAF, ***6 ГеВ (12 ГеВ), 1400 м***

Thomas Jefferson National Accelerator Facility (TJNAF), Jefferson Lab, Jlab, USA

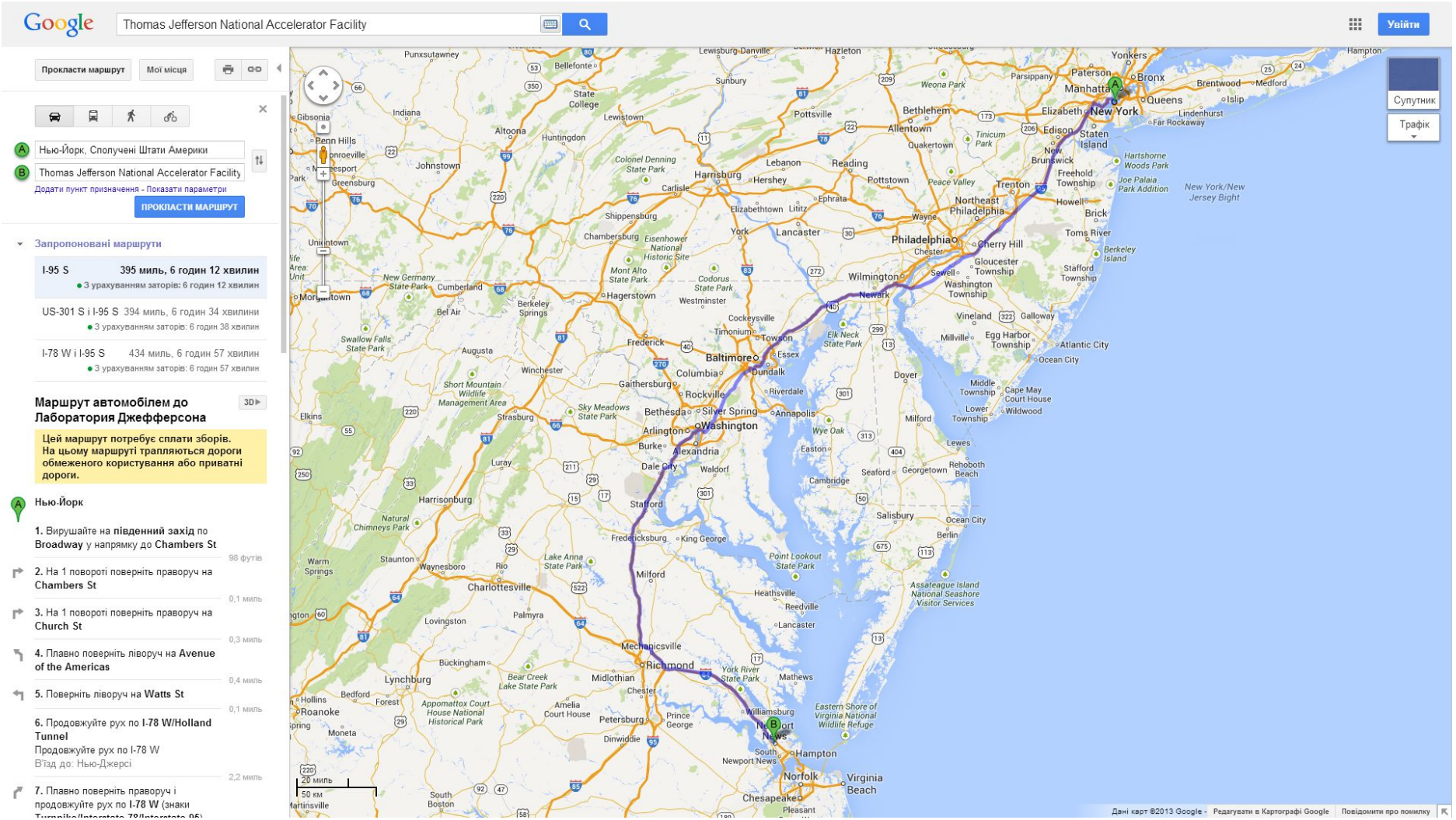


CEBAF, 6 ГеВ (12 ГеВ), 1400 м

Thomas Jefferson National Accelerator Facility (TJNAF), Jefferson Lab, Jlab, USA



Thomas Jefferson National Accelerator Facility (TJNAF), Jefferson Lab, Jlab, USA



Індукційні прискорювачі
Бетатрон

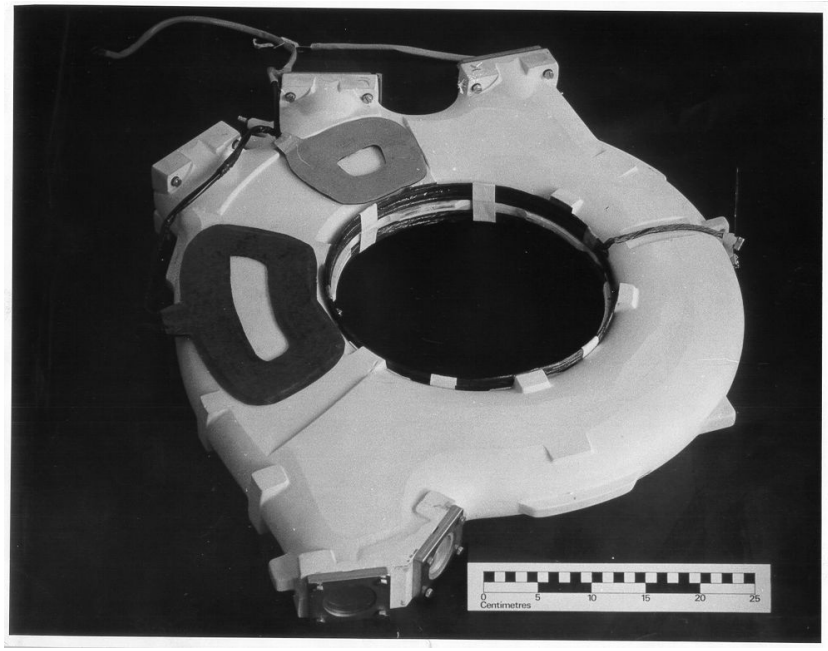
Зміна магнітного поля призводить до утворення індукованого електричного поля, яке може прискорювати заряджені частинки

Ідея Відерое (Wideröe) □ перший електронний прискорювач, робота якого базується на магнітній індукції (Donald Kerst, 1940 рік, 2.3 МеВ)

Courtesy of the Department of Physics, University of Wisconsin

Donald William Kerst
* 1 November 1911, Galena, Illinois
† 19 August 1993Robert

Індукційні прискорювачі
Бетатрон



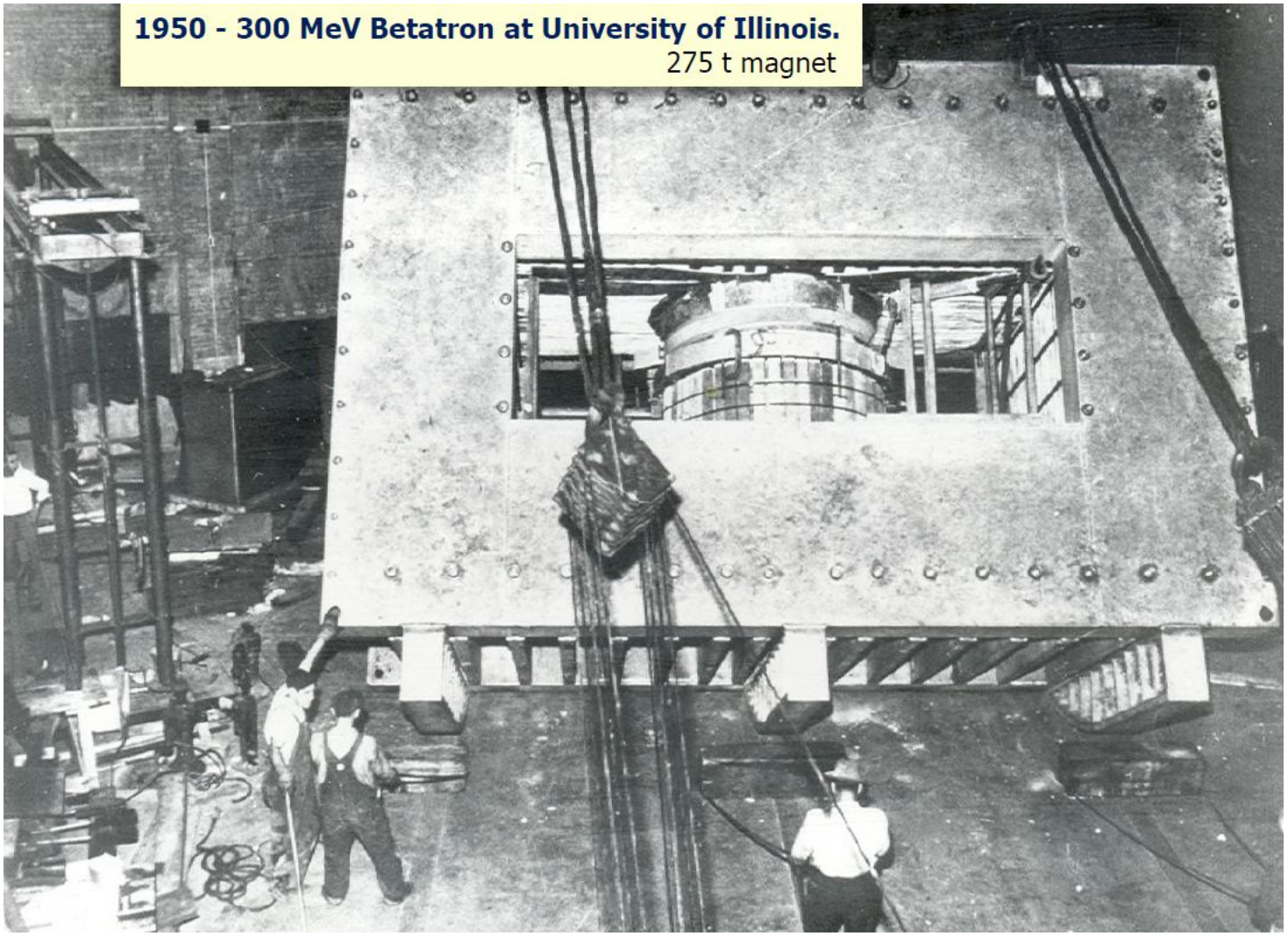
Сталість орбіти досягається при виконанні так званої бетатронної умови:
$2B_{\text{орб}}=\langle B\rangle$, де $\langle B\rangle$ - середнє значення індукції магнітного поля в площині, яка охоплюється орбітою; **B**орб - індукція магнітного поля на орбіті.

$$pc = eB\rho$$

$$\frac{dp}{dt} = \frac{1}{c}\frac{e}{2\pi\rho}\frac{\partial\Phi}{\partial t}$$

Bρ – магнітна жорсткість

Індукційні прискорювачі
Бетатрон



Бетатрон. Вакуумна камера бетатрона